



**CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD DE FRACTURA BAJO LA
NORMA ASTM E 399-08 (PROBETA SENB), EN ACEROS AISI-SAE
5160 H, UTILIZADO EN FABRICACIÓN DE BALLESTAS.**

JUAN CARLOS MARTÍNEZ ROMERO

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica
Bogotá, Colombia
2011**

CARACTERIZACIÓN DE LA TENACIDAD DE FRACTURA BAJO LA NORMA
ASTM E 399-08 (PROBETA SENB), EN ACEROS AISI-SAE 5160 H, UTILIZADO
EN FABRICACIÓN DE BALLESTAS.

JUAN CARLOS MARTÍNEZ ROMERO

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería, Materiales y Procesos

Director:
M. Ing. EDGAR ESPEJO MORA

Línea de Investigación:
Mecanismos de falla de elementos de máquinas
Grupo de Investigación:
AFIS (Análisis de Falla, Integridad y Superficies)

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica
Bogotá, Colombia
2011

“A mi Juanich y mi Adri”

A mi Mami por su comprensión y amor
A mi Papi, por su ejemplo como padre, esposo y persona
A mis hermanos Nubia, Pilar, Helena, Gloria, Teresa y Ernesto
Especialmente a Nubi por su apoyo incondicional desde siempre
Ante todo a mi DIOS y la VIRGEN por que me aman y me han permitido ser feliz.

Agradecimientos

Edgar Espejo Mora, Ingeniero Mecánico, M. Ing., Director de la tesis, quien con sus valiosos aportes, dedicada colaboración e interés en adquirir y transmitir su conocimiento hizo posible el desarrollo y culminación de éste proyecto.

Héctor Delgado Fiallo, Ingeniero Metalúrgico, Msc. Ing., quien estuvo siempre alentando, respaldando y apoyando incondicionalmente mi desarrollo profesional.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, por brindarme el espacio y los medios necesarios para contribuir en mi formación profesional y personal.

Empresa Industrias Metálicas Asociadas IMAL S.A, en especial al Ing. Alexander Viloria, por su valiosa asesoría.

Abstract

This project evaluates the behavior of fracture toughness in specimens of AISI-SAE 5160H steel used in the manufacture of automotive leaf spring. Specimens from four suppliers were subjected to quenched and tempered from seven different temperatures. The specimens were precracking in fatigue machine and subject to fracture toughness test in SENB settings, creating fracture surfaces, which were classified and inspected macroscopically (to simple view and in stereoscopic) and microscopic (scanning electron microscope-SEM). The material was characterized by chemical analysis, hardness and metallography. Ruled in Standard E399-08 was selected the type of specimen, was determined the precracking assembly and the fracture toughness was calculated in terms of J_{total} and $J_{critical}$. With the development of this project found that the tempered temperature influenced the fracture toughness and was evident that one of the providers had a strong performance at lower fracture toughness than the other three suppliers.

Keywords:

Fracture toughness T_e , AISI-SAE 5160H, quenched and tempered, ASTM E399-08, J integral.

Contenido

	Pág.
1 MARCO TEÓRICO.....	4
1.1 TENACIDAD DE FRACTURA	4
1.1.1 Modos de carga que pueden aplicarse a una grieta.....	4
1.1.2 Apartados relevantes de las normas ASTM E399-08 y ASTM E 1820-09	5
1.2 FRACTOGRAFÍA	8
1.2.1 Tipos de Fractura	8
1.2.1.1 Fractura dúctil.	8
1.2.1.2 Fractura frágil.....	8
1.2.1.3 Fractura progresiva por fatiga.	8
1.2.2 Micromecanismos básicos de crecimiento de grieta	9
1.2.2.1 Fractura intergranular	9
1.2.2.2 Clivaje	9
1.2.2.3 Microvacíos	9
1.2.2.4 Estriaciones de fatiga.....	10
1.3 TRATAMIENTO TÉRMICO DE REVENIDO	10
1.4 ACERO AISI-SAE 5160H	12
1.5 EFECTO DE ELEMENTOS ALEANTES EN LA TEMPLABILIDAD Y TENACIDAD DE LOS ACEROS.....	14
2 DESARROLLO EXPERIMENTAL	17
2.1 PRUEBA PILOTO Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS	17
2.2 OBTENCIÓN DE PROBETAS.....	22
2.3 PREAGRIETAMIENTO Y FLEXIÓN DE PROBETAS.....	27

2.4	CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS ENSAYADAS Y DEL MATERIAL.....	31
2.4.1	Fractografía.....	31
2.4.1.1	Inspección visual.....	31
2.4.1.2	Microscopio electrónico de barrido SEM.....	31
2.4.2	Caracterización del material.....	35
2.4.2.1	Composición química.....	35
2.4.2.2	Dureza.....	36
2.4.2.3	Metalografía.....	36
3	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS	40
3.1	PREAGRIETAMIENTO EN LA MÁQUINA DE FATIGA.....	40
3.2	FLEXIÓN EN LA MÁQUINA UNIVERSAL.....	42
3.3	FRACTOGRAFÍA, METALOGRAFÍA, DUREZA Y TENACIDAD DE FRACTURA	47
3.3.1	Fractografía.....	47
3.3.2	Metalografía.....	54
3.3.3	Durezas.....	56
3.3.4	Tenacidad de fractura.....	57
3.3.5	Resumen de resultados por tratamiento.....	60
4	ANÁLISIS DE PRUEBAS Y RESULTADOS	62
4.1	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	63
4.2	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA TENACIDAD DE FRACTURA	69
5	CONCLUSIONES.....	74
6	APÉNDICES.....	77

6.1	APÉNDICE A: PROBETAS, CARGAS, CRECIMIENTO DE GRIETA Y TAMAÑO FINAL DE LA GRIETA, OBTENIDO EN EL PREAGRIETAMIENTO POR FATIGA.....	78
6.2	APÉNDICE B: TABLAS DE DATOS DE CARGA, ESFUERZO Y ENERGÍA OBTENIDOS EN EL ENSAYO DE FLEXIÓN POR MEDIO DEL SOFTWARE <i>TRAPEZIUM</i>	87
6.3	APÉNDICE C: GRÁFICAS DE CARGA CONTRA ALARGAMIENTO OBTENIDAS CON EL SOFTWARE <i>TRAPEZIUM</i> , EN EL ENSAYO DE FLEXIÓN.	92
6.4	APÉNDICE D: TIPO DE TRAYECTORIA DE GRIETA.....	121
6.5	APÉNDICE E: TIPO DE SUPERFICIE DE FRACTURA DEPENDIENDO DE LA TOPOGRAFÍA.....	146
6.6	APÉNDICE F: TIPO DE FRACTURA MICROSCÓPICA EN MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO - SEM.....	171
6.7	APÉNDICE G: MICROESTRUCTURA.	180
6.8	APÉNDICE H: DUREZAS RC	189
6.9	APÉNDICE I: PORCENTAJE DE MECANISMO DE FRACTURA MICROSCOPICO EN ZONA DE FLEXIÓN.	193
7	BIBLIOGRAFÍA.....	201

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1.1. Modos de carga en una grieta.	5
Figura 1.2. Principales tipos de gráficas de carga vs desplazamiento.....	6
Figura 1.3. Definición del área para el cálculo de J usando el método básico.....	7
Figura 1.4. Micromecanismos de crecimiento de grieta, A-intergranular, B-Transgranular, C-microvacíos, D- estriaciones de fatiga.....	10
Figura 1.5 Etapas de revenido.	12
Figura 1.6. Curvas de transformación para el acero 5160 H.	13
Figura 2.1. Configuración geometría y requerimientos de la probeta de flexión en tres puntos usada en la prueba piloto y en los ensayos finales de tenacidad de fractura.....	17
Figura 2.2. Detalle de la entalla.	18
Figura 2.3. Configuración de la carga.	18
Figura 3.1. Gráfica tipo I.	43
Figura 3.2. Gráfica tipo IE.	44
Figura 3.3. Gráfica tipo II.	45
Figura 3.4. Gráfica tipo IIE.	46
Figura 3.5. Durezas vs temperatura de revenido para cada proveedor.	56
Figura 3.6. J crítico para cuatro proveedores y siete temperaturas de revenido. ..	59
Figura 3.7. J total para cuatro proveedores y siete temperaturas de revenido.	59
Figura 4.1. J crítico para cuatro proveedores y siete temperaturas de revenido. ..	62
Figura 4.2. J total para cuatro proveedores y siete temperaturas de revenido.	63

Lista de fotos

	Pág.
Foto 2.1. Maquina de corte y montaje para obtener las probetas con dimensiones aproximadas.	24
Foto 2.2. Corte de los extremos del material suministrado.	24
Foto 2.3. Trazo de las probetas con una sobremedida.	24
Foto 2.4. Fresadora donde se dio la medida, acabado final y se generó la entalla.	25
Foto 2.5. Detalle de la entalla mecanizada en una probeta.	25
Foto 2.6. Tratamiento térmico de temple y revenido. a- Precalentamiento, b- Austenización, c- Temple, d- Revenido.	26
Foto 2.7. Pulido de la probeta y trazo de los límites de parada de la grieta entre 0,45W – 0,55W.	27
Foto 2.8. Máquina de fatiga usada para el preagrietamiento de las probetas.	28
Foto 2.9. Montaje de la probeta a ser preagrietada.	29
Foto 2.10. Inspección del inicio o crecimiento de la grieta.	29
Foto 2.11. Probeta preagrietada hasta aproximadamente 0,5W.	29
Foto 2.12. Máquina universal Shimadzu, donde se realizó la flexión.	30
Foto 2.13. Montaje y flexión de una probeta.	30
Foto 2.14 Superficie de fractura de una probeta flexionada. 15X.	32
Foto 2.15. Microscopio electrónico de barrido SEM usado en el proyecto, FEI QUANTA 200.	32
Foto 2.16. Zonas características de la fractura de las probetas. SEM. 17X.	33
Foto 2.17. Detalle de la zona 1 de una probeta típica, con presencia de estrías. SEM. 6000X.	33
Foto 2.18. Detalle de la zona 2, zona de interfaz. SEM. 1600X.	34

Foto 2.19. Detalle de la zona 3, clivaje. SEM. 800X.	34
Foto 2.20. Espectrómetro de chispa UV-VIS marca BAIRD, usado en el proyecto.	35
Foto 2.21. Durómetro usado para el proyecto.	37
Foto 2.22. Inclusiones A2f y D2g, de los 4 proveedores, sección longitudinal. 100X.	38
Foto 2.23. Microestructura de los cuatro proveedores en estado de suministro, sección trasversal. Granos de perlita y red de ferrita. Nital 3%. 800X.	38
Foto 3.1. Tipos de fractura según la trayectoria.....	47
Foto 3.2. Grupos organizados por proveedor y temperatura de revenido de probetas fracturadas, selección de una probeta característica para análisis.....	48
Foto 3.3. Tipos de superficie de fractura según su textura.	48
Foto 3.4. Zonas inspeccionadas en microscopio electrónico de barrido SEM. 20X.	49
Foto 3.5. Mecanismo microscópico de fractura por fatiga en zona de preagrietamiento, evidencia de estriaciones de fatiga. 3000X. SEM.	50
Foto 3.6. Mecanismo microscópico combinado de fractura intergranular y estrías en zona de preagrietamiento. 800X. SEM.	50
Foto 3.7. Zona de interfaz entre la parte preagrietada (estriaciones) y la parte fracturada (clivaje). 800X. SEM.	51
Foto 3.8. Zona de interfaz entre la parte preagrietada (estriaciones) y la parte fracturada (microvacíos). 1600X. SEM.	51
Foto 3.9. Mecanismo microscópico de fractura por clivaje en zona fracturada durante flexión. 800X. SEM.	52
Foto 3.10. Mecanismo microscópico por fractura intergranular en zona fracturada durante flexión. 1600X. SEM.	52
Foto 3.11. Mecanismo microscópico de fractura por microvacíos en zona fracturada durante flexión. 800X. SEM.	53

Foto 3.12. Combinación de mecanismo de fractura por clivaje con microvacíos en zona fracturada durante flexión. 1600X. SEM.	53
Foto 3.13. Combinación de mecanismo de fractura intergranular con microvacíos en zona fracturada durante flexión. 800X. SEM.....	54
Foto 3.14. Morfología de una inclusión tipo óxido. 1600X. SEM.....	55
Foto 3.15. Microestructura característica de las probetas templadas y revenidas a las diferentes temperaturas de los diferentes proveedores. Nital 3%. 800X.....	55

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2.1. Composición química del material del proveedor 1. Porcentaje en peso.	36
Tabla 2.2. Composición química del material del proveedor 2. Porcentaje en peso.	36
Tabla 2.3. Composición química del material del proveedor 3. Porcentaje en peso.	36
Tabla 2.4. Composición química del material del proveedor 4. Porcentaje en peso.	36

Lista de cuadros

	Pág.
Cuadro 1.1. Rango de composición elemental de acero AISI-SAE 5160H.....	13
Cuadro 2.1. Dimensiones de la probeta y resultados de la prueba de tenacidad de fractura.....	19
Cuadro 2.2. Valor de K_{IC} calculado para cada muestra.....	19
Cuadro 2.3. Factores y niveles del diseño de experimentos.....	20
Cuadro 2.4. Análisis de relación entre Factor (proveedor) y Factor (temperatura de revenido).....	22
Cuadro 2.5. Proveedor, lote y colada.....	22
Cuadro 2.6. Numeración de probetas para cada proveedor.	23
Cuadro 2.7. Durezas del material de los proveedores, en estado de suministro. ...	37
Cuadro 3.1. Relación de carga y número de ciclos de probetas revenidas a 250 °C.	41
Cuadro 3.2. Datos obtenidos con el software <i>trapezium</i>	42
Cuadro 3.3. Valores de durezas para las probetas tratadas a 250 °C.....	56
Cuadro 3.4. Valores de J total y J crítico para el proveedor 1.....	57
Cuadro 3.5. Valores de J total y J crítico para el proveedor 2.....	57
Cuadro 3.6. Valores de J total y J crítico para el proveedor 3.....	58
Cuadro 3.7. Valores de J total y J crítico para el proveedor 4.....	58
Cuadro 3.8. Resumen de resultados por tratamiento.	60
Cuadro 4.1. Datos de J crítico para el análisis de varianza.	64
Cuadro 4.2. Resumen Análisis de varianza de un factor para J crítico.....	64
Cuadro 4.3. Análisis de varianza de un factor para J crítico.	64
Cuadro 4.4. Datos de J total para el análisis de varianza.	64

Cuadro 4.5. Resumen análisis de varianza de un factor para J total.....	65
Cuadro 4.6. Análisis de varianza de un factor para J total.....	65
Cuadro 4.7.Verificación de diferencia estadística para las temperaturas de revenido y las combinaciones entre proveedores, de Jtotal.	66
Cuadro 4.8.Verificación de diferencia estadística para las temperaturas de revenido y las combinaciones entre proveedores, de Jcrítico.....	66
Cuadro 4.9. Datos de J crítico $[N/m]$ para el análisis de varianza.....	67
Cuadro 4.10. Resumen Análisis de varianza de un factor para J crítico $[N/m]$	67
Cuadro 4.11. Análisis de varianza de un factor para J crítico.	67
Cuadro 4.12. Datos de J total $[N/m]$ para el análisis de varianza.....	67
Cuadro 4.13. Resumen análisis de varianza de un factor para J total.....	68
Cuadro 4.14. Análisis de varianza de un factor para J total.....	68

INTRODUCCIÓN

La fractura de materiales de ingeniería es casi siempre un hecho indeseable por varias razones, tales como la seguridad de vidas humanas, pérdidas económicas y la interferencia con la disponibilidad de productos y servicios. La industria automotriz ha estado siempre a la vanguardia en investigación ya que el mercado cada vez es más competido y exige productos de confiabilidad y de bajo costo. Los fabricantes y usuarios de ballestas desean buen desempeño, durabilidad y una reducción en el peso ya que esto se refleja en el consumo de combustible, por lo cual es más competitivo fabricar ballestas que ofrezcan la mayor tolerancia al daño posible, y con una alta tenacidad de fractura se asegura una mayor vida útil de las ballestas ante la presencia de discontinuidades.

El objetivo general del presente proyecto fue evaluar la influencia tanto de proveedores como de la temperatura de revenido, para el acero AISI-SAE 5160 H, ante el Ensayo de Tenacidad de Fractura en Deformación Plana para probetas con flexión en tres puntos y grieta en un borde, además como objetivos específicos se pretendió: 1- evaluar el comportamiento del acero AISI-SAE 5160H ante el ensayo de Tenacidad de fractura, para cada uno de los cuatro proveedores de material. 2- Evaluar el efecto de la temperatura de tratamiento térmico de revenido (250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 550°C) en el comportamiento a Tenacidad de fractura del acero AISI-SAE 5160 H. 3- Analizar la relación entre el comportamiento a tenacidad de fractura encontrado y la microestructura obtenida por la combinación entre proveedor y temperatura de revenido. 4- Analizar la relación entre el comportamiento a tenacidad de fractura encontrado y el micromecanismo de fractura obtenido por la combinación entre proveedor y temperatura de revenido.

El acero AISI-SAE 5160 H, es utilizado en general como materia prima para la fabricación de resortes y ballestas, y en particular utilizado por la empresa Industrias Metálicas Asociadas IMAL S.A., en la fabricación de ballestas. Al momento de iniciar éste proyecto la empresa tenía cuatro diferentes proveedores de acero AISI-SAE 5160 H, por tal motivo éstos fueron seleccionados para ser analizados. Basados en las condiciones de manufactura de ballestas en la empresa, se seleccionaron las variables de fabricación para realizar las pruebas de las probetas con características similares.

El capítulo uno inicia con una descripción teórica de los aspectos relevantes en el desarrollo del proyecto, por lo tanto se incluyen apartados tales como fractografía, tenacidad de fractura, propiedades del acero AISI-SAE 5160H, el efecto de los elementos aleantes en la templabilidad y tenacidad de los aceros, la relación entre el crecimiento de grieta y el estado de esfuerzos y por último los tópicos utilizados de las normas ASTM E 399-08 y ASTM E1820-09.

En el capítulo dos se expone inicialmente el desarrollo experimental basado en la prueba piloto, con la cual se determinó el número de replicas adecuado (tres probetas de tenacidad de fractura); seguidamente se describirá los pasos y aspectos importantes en la obtención de las probetas, luego se detallarán las condiciones y tópicos relevantes en la ejecución de los ensayos de preagrietamiento y flexión y en los análisis de caracterización de las probetas ensayadas.

En el capítulo tres se relacionan los resultados de los ensayos de preagrietamiento y flexión y de los análisis de fractografía, metalografía, dureza y tenacidad de fractura, terminando con un resumen de resultados por tratamiento y generando una tabla en la cual se relacionan los resultados y comportamientos revelados en las diferentes probetas analizadas.

El último capítulo correspondiente al cuatro, se destina para análisis de pruebas y resultados, basados en las tendencias dadas en las tablas y gráficas y en el análisis estadístico elaborado para verificar la influencia tanto de proveedores como de temperaturas sobre el valor de la tenacidad de fractura, además se realiza un análisis detallado del comportamiento de la tenacidad de fractura para las diferentes combinaciones de proveedor y temperatura de revenido, y de la influencia de las propiedades del material y del tratamiento térmico en la tenacidad de fractura.

1 MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se dará la teoría básica sobre tenacidad de fractura, tratamiento térmico de revenido, análisis fractográfico, propiedades básicas del acero AISI-SAE 5160H, y el efecto de los elementos aleantes en la templabilidad y tenacidad de los aceros.

1.1 TENACIDAD DE FRACTURA

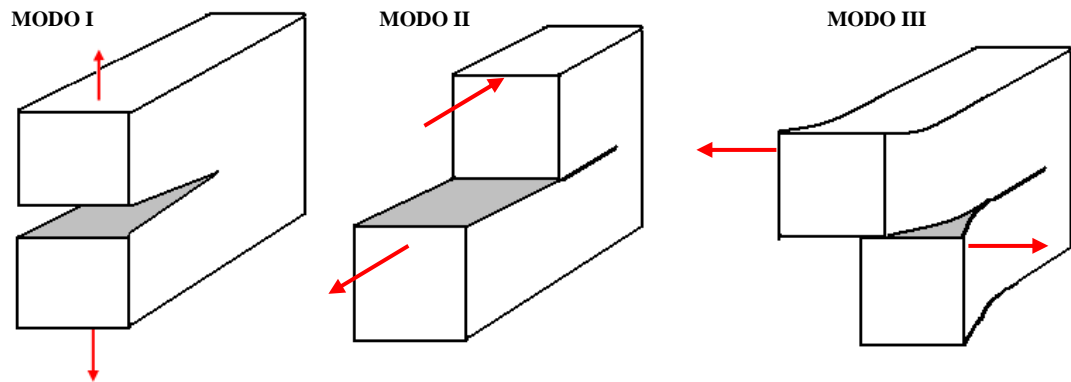
La mecánica de fractura estudia el comportamiento de los materiales con fisuras o pequeños defectos cuando se les aplica carga. En condiciones de carga normales, en los alrededores del extremo de una grieta se genera un campo de esfuerzos complejo, la intensidad elástica de dicho campo de esfuerzos se cuantifica por el factor de intensidad de esfuerzos, si éste factor alcanza un valor límite, con solo una pequeña deformación plástica en el extremo de la grieta, se generará una falla por crecimiento de grieta, el valor límite del factor de intensidad de esfuerzos al cual se da la falla es conocido como *tenacidad de fractura*, la cual depende de variables metalúrgicas, geométricas, temperatura y condiciones de aplicación de carga. Cuando en el extremo de una grieta se da una zona plástica pequeña rodeada de un campo de esfuerzos elásticos cuya intensidad es determinada por el factor de intensidad de esfuerzo, se tiene que si K_I (factor que cuantifica la intensidad de los esfuerzos alrededor de la punta de grieta en función del esfuerzo nominal y el tamaño de grieta) alcanza un valor crítico K_{Ic} (tenacidad de fractura) se presenta un crecimiento rápido e inestable de grieta. Para un espesor $B_0 \geq 2,5(K_{Ic}/S_y)^2$, donde S_y es la resistencia a fluencia, se presenta un valor mínimo de la tenacidad de fractura invariante con el espesor, conocido como tenacidad de fractura en deformación plana K_{Ic} , ya que la deformación en la dirección del espesor es aproximadamente cero; K_{Ic} es una propiedad del material que cuantifica la resistencia a la propagación inestable de grieta.

1.1.1 Modos de carga que pueden aplicarse a una grieta

Hay tres modos de carga que pueden aplicarse a una grieta, figura 1.1:

- Modo I: Abertura de grietas.
- Modo II: Cizallamiento en el plano.
- Modo III: Cizallamiento fuera del plano.

Figura 1.1. Modos de carga en una grieta.

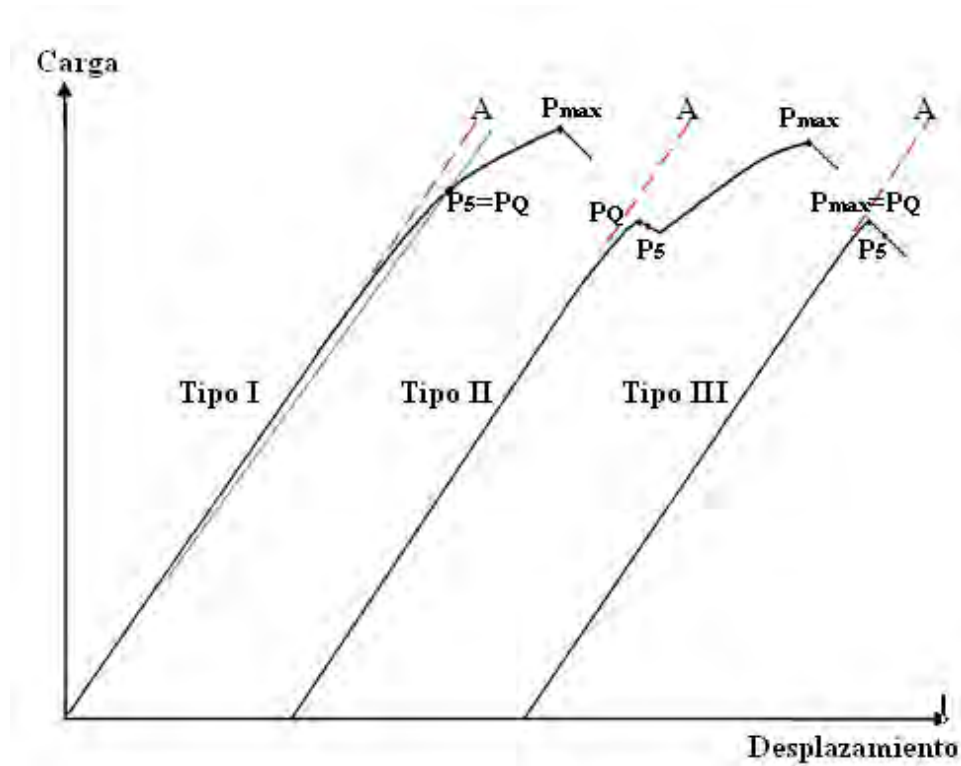


El Modo I es de apertura o tensión, donde las tensiones y deformaciones en el plano son simétricas respecto al eje del plano de la grieta. En el Modo II, modo de deslizamiento o cortadura en el plano, donde las tensiones y deformaciones son antisimétricas con respecto al eje del plano de la grieta. El Modo III, de cortadura antiplanar, donde las tensiones y deformaciones fuera del plano son antisimétricas respecto al eje del plano de la grieta.

1.1.2 Apartados relevantes de las normas ASTM E399-08 y ASTM E 1820-09

La norma ASTM E399-08, es utilizada para hallar la tenacidad de fractura K_{Ic} , en deformación plana lineal elástica, usando una probeta preagrietada, en ésta norma se describe la geometría y características de la entalla para las probetas, además da los parámetros y limitaciones para la fabricación de las probetas y las medidas y configuración para el montaje, para el tipo de probeta seleccionada; para el proyecto se utilizó una probeta tipo SENB (single edge notched bend). En el numeral 9 página 9 de la norma, se dan las pautas para el cálculo e interpretación de los resultados; para las pruebas realizadas en el proyecto la máquina universal contaba con un software el cual tenía adquisición de datos, por tal motivo se utilizó el procedimiento descrito para estos casos, las gráficas obtenidas con el programa trapezium de la máquina universal, mostraban el $P_{max.}$, durante la prueba, se debía encontrar el valor de P_Q , y la manera de hallarlo se basa en las curvas mostradas en la gráfica 7, página 9 de la norma, las cuales se muestran en la figura 1.2, dependiendo de la forma de la curva de carga contra desplazamiento obtenida en el ensayo de tenacidad de fractura en configuración SENB, se determinó el valor de P_Q . La norma en el numeral 9.1.3, página 10, muestra la manera para validar si los valores obtenidos de tenacidad son consistentes, por lo cual se debe cumplir la relación de $P_{max}/P_Q < 1,1$, de no cumplirse ésta relación se debe utilizar la norma ASTM E 1820 para tenacidad de fractura elástico-plástica.

Figura 1.2. Principales tipos de gráficas de carga vs desplazamiento.



En los casos en los cuales no es válido utilizar K_{Ic} es necesario utilizar alguno de los criterios dados en la norma ASTM E1820-09, en los casos en los cuales se utiliza un software con adquisición de datos durante el ensayo de tenacidad de fractura, la integral J se puede utilizar para hallar la tenacidad de fractura en caso de configuración SENB, en la gráfica A.1.2 página 14 de la norma se da la definición del área para el cálculo de J utilizando el método básico, figura 1.3, el área total bajo la curva es proporcional a J_{total} , mientras que el área hasta la primera inestabilidad o paso a la zona no lineal es proporcional al $J_{critico}$. J_{total} se calcula a través de la ecuación 1.1 y $J_{critico}$ con la ecuación 1.2. Debido a que el $J_{critico}$ corresponde a la zona de comportamiento elástico, se tiene una relación directa con K_{Ic} dada por la ecuación a 1.3.

$$J_{total} = \frac{\eta A_{total}}{Bb}$$

Ecuación 1.1

donde: $\eta=2$.

B=Ancho de probeta.

b= (B-longitud de grieta).

A_{total}: Área total bajo la curva, fig. 1.3.

$$J_{crítico} = \frac{\eta A_{elástica}}{Bb} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

donde: $\eta=2$.

B=Ancho de probeta.

b= (B-longitud de grieta).

A_{elast}: Área elástica bajo la curva, fig. 1.3.

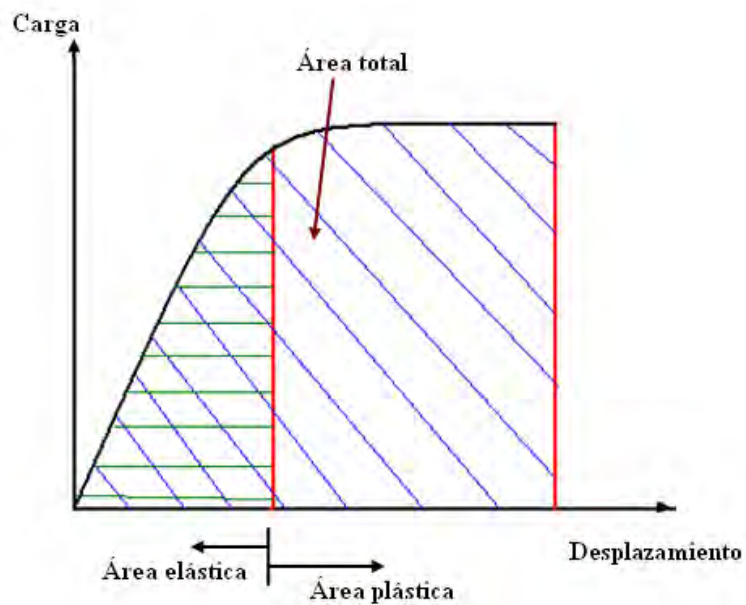
$$J_{crítico} = \frac{K_I^2}{E'} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

donde: $E' = E/(1-\nu^2)$ en deformación plana.

$E'=E$ para esfuerzo plano.

E= Modulo de elasticidad, ν = Relación de Poisson.

Figura 1.3. Definición del área para el cálculo de J usando el método básico.



1.2 FRACTOGRAFÍA

La fractografía es el estudio de las características de la superficie de fractura, se puede analizar cualitativamente las condiciones bajo las cuales se generan y propagan las grietas, la inspección se realiza desde exámenes a escala macroscópica (a simple vista), hasta niveles microscópicos (utilizando microscopía electrónica de barrido-SEM). Las heterogeneidades microestructurales (inclusiones, límites de grano, precipitados de segunda fase, agrupación de dislocaciones) controlan la capacidad del material a resistir la iniciación o propagación de la grieta y pueden ser identificadas en la superficie de fractura como caminos fáciles para las grietas. Dependiendo de la topografía de la superficie de fractura se presentan superficies características macroscópicamente y microscópicamente.

1.2.1 Tipos de Fractura

Dependiendo de la morfología, forma, color y en general de las características de las fracturas se pueden clasificar en tres grandes grupos, dúctiles, frágiles y progresivas.

1.2.1.1 Fractura dúctil.

Las fracturas dúctiles se caracterizan por la rasgadura del metal acompañada de una considerable deformación plástica, a simple vista se caracteriza por apariencia gris fibrosa, microscópicamente se relacionan con el mecanismo microscópico de formación de microvacíos.

1.2.1.2 Fractura frágil.

Las fracturas frágiles se caracterizan por una propagación rápida de grieta con baja liberación de energía y con poca o nula deformación plástica, a simple vista se caracterizan por tener apariencia granular brillante, microscópicamente se relacionan con los mecanismos microscópicos de fractura intergranular y clivaje.

1.2.1.3 Fractura progresiva por fatiga.

Se genera a partir de una grieta microscópica o de una imperfección, la grieta se propaga bajo la influencia de esfuerzos repetitivos, alternantes o cíclicos, los

cuales están por debajo de la resistencia a tensión del material. Si la propagación de la grieta es intermitente, ésta puede dejar una marca macroscópica visible llamada marca de playa, el origen de la grieta de fatiga está usualmente en el lado cóncavo de las curvas de las marcas de playa, microscópicamente se relacionan con mecanismos microscópicos de fractura transgranular por estrías de fatiga.

1.2.2 Micromecanismos básicos de crecimiento de grieta

A escala microscópica los tipos de fractura tienen características y apariencias típicas, por lo cual normalmente las fracturas frágiles se asocian con micromecanismo de fractura intergranular y clivaje, las fracturas dúctiles se relacionan con micromecanismo de formación de microvacíos y las progresivas por fatiga se identifican por la presencia de estriaciones de fatiga.

1.2.2.1 Fractura intergranular

Éste tipo de fractura se identifica porque revela el carácter tridimensional de los granos, hay una variedad de diferentes situaciones en las cuales se favorece el crecimiento intergranular de las grietas: 1- Precipitación de una fase frágil en el límite de grano, 2- Fragilización por hidrogeno y metal líquido, 3- agrietamiento asistido por el ambiente, 4- corrosión intergranular y 5- cavitación y agrietamiento en límite de grano a altas temperaturas. Los límites de grano se pueden fragilizar debido a la segregación de impurezas tales como fósforo y azufre hacia el límite de grano de la austenita. La trayectoria de la grieta es siguiendo los límites de grano, figura 1.4 A.

1.2.2.2 Clivaje

La fractura por clivaje puede ser definida como la propagación rápida de una grieta a lo largo de un plano cristalográfico particular. El clivaje puede ser frágil, pero éste puede estar precedido a gran escala por flujo plástico y crecimiento dúctil de grieta. Los planos preferentes para el clivaje son los que tienen baja densidad de empaquetamiento ya que se deben romper menos enlaces y el espacio entre los planos es mayor. En materiales policristalinos la trayectoria es transgranular, figura 1.4 B.

1.2.2.3 Microvacíos

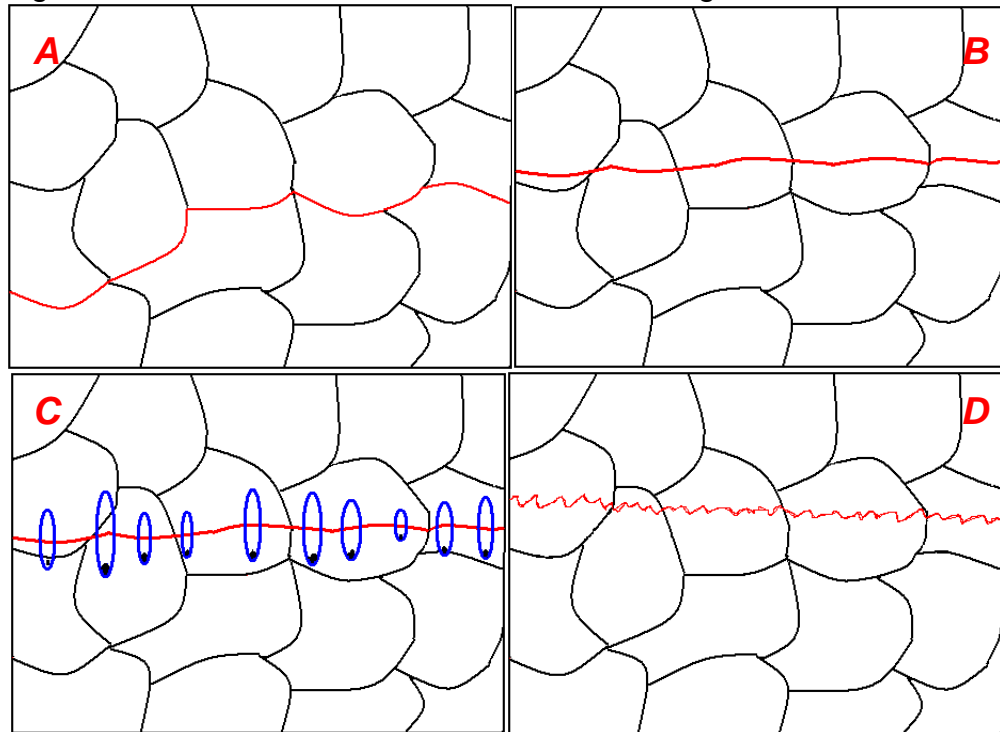
Los microvacíos nuclean en inclusiones y partículas de segunda fase, los vacíos crecen juntos hasta formar una imperfección macroscópica, la cual conduce a la fractura. Las etapas observadas en una fractura dúctil son: 1-formación de una

superficie libre en una inclusión o partícula de segunda fase, por decohesión en la interfaz o agrietamiento de la partícula, 2- Crecimiento del vacío alrededor de la partícula, 3- coalescencia entre los vacíos desarrollados, figura 1.4 C.

1.2.2.4 Estriaciones de fatiga.

Las fracturas generadas por propagación en el tiempo por fatiga de material se caracterizan por las estriaciones de fatiga, que son marcas microscópicas dejadas en la superficie de fractura, estas marcas se forman en cada ciclo de carga y descarga del material. La trayectoria seguida por la grieta es normalmente transgranular, figura 1.4 D.

Figura 1.4. Micromecanismos de crecimiento de grieta, A-intergranular, B-Transgranular, C-microvacíos, D- estriaciones de fatiga.



1.3 TRATAMIENTO TÉRMICO DE REVENIDO

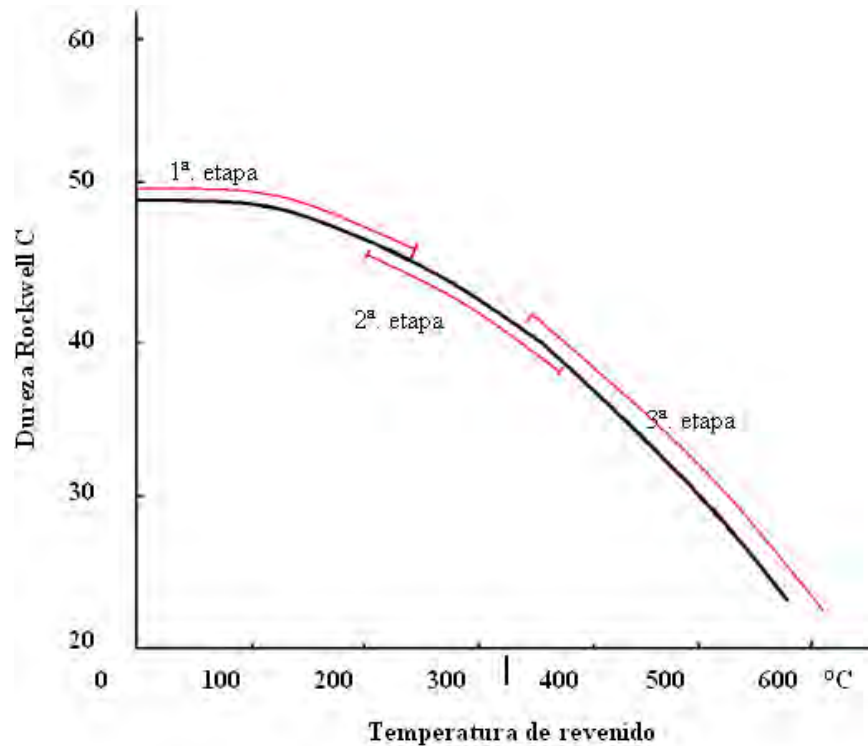
Los propósitos del revenido son modificar y adecuar las propiedades obtenidas en el temple y para proporcionar algún alivio de tensiones al acero, ya que durante el temple la estructura endurecida queda bajo algún grado de tensión interna debido

a los gradientes de temperatura en la sección de la probeta, a los cambios de volumen que acompañan la transformación de la austenita o a una combinación de los dos. Con el temple del acero se obtienen condiciones martensíticas, durante el proceso de revenido se da la segregación del carbono a los defectos de red y la precipitación de los carburos, la descomposición de la austenita retenida y la recuperación y recristalización de estructuras martensíticas. Además el revenido produce cambios microestructurales y de las propiedades que están relacionadas con la estructura existente cuando empieza el revenido y con el ciclo de temperaturas que se aplique. Las unidades de la martensita son tiras que se agrupan en paquetes mayores, su subestructura está constituida por una alta densidad de dislocaciones organizadas en celdas, cada tira de martensita está compuesta por muchas celdas de dislocaciones. También se puede presentar la martensita tipo placa o maclada, estas maclas generalmente no se extienden hasta los lados de las placas sino que degeneran en un arreglo complejo de dislocaciones cerca de la periferia de la misma.

Durante el revenido se presentan diferentes etapas, inicialmente se presenta el fenómeno de segregación del carbono, durante el temple y en revenidos a baja temperatura se presenta el proceso de autorevenido, en el cual hay un breve periodo durante el cual se pueden redistribuir por si mismos los átomos de carbono, debido a los cambios de tensión que hay alrededor de las dislocaciones individuales y en las paredes de las celdas de la martensita masiva, ciertos sitios intersticiales cercanos a esos defectos proporcionan lugares de más baja energía para el carbono, que las posiciones intersticiales normales de la red. Durante el temple el carbono se segrega hacia los defectos de red, tales sitios se saturan y los átomos de carbono permanecen en la red libre de defectos. Luego de la etapa inicial de segregación, se suceden cuatro etapas durante el revenido, la primera comprende desde temperatura ambiente hasta 200°C en la que ocurre la precipitación del carbono épsilon ϵ , la segunda se extiende desde 150°C hasta 300°C, en la cual ocurre la descomposición de la austenita retenida, la tercera va desde 150°C hasta 700°C, durante ésta etapa se precipita la cementita, y en la cuarta etapa solo existe en los aceros que contienen elementos formadores de carburos, en este periodo se precipitan carburos finos a unos 500°C, originando el endurecimiento secundario. En los aceros normales al aumentar la temperatura de revenido disminuye la dureza, figura 1.5, la dureza cambia poco hasta 100°C, debido a que todos los procesos de segregación del carbono se completan durante el temple, en los aceros de alto carbono la formación del carburo entre 150°C y 250°C produce una disminución de la dureza, entre 300°C y 400°C se presenta formación de arreglo tipo Widmanstätten de barras de Fe_3C , lo cual

produce una gran reducción de dureza, la posterior esferoidización de esos carburos y la recuperación y recristalización a temperaturas mayores lleva a la disminución de dureza.

Figura 1.5 Etapas de revenido.



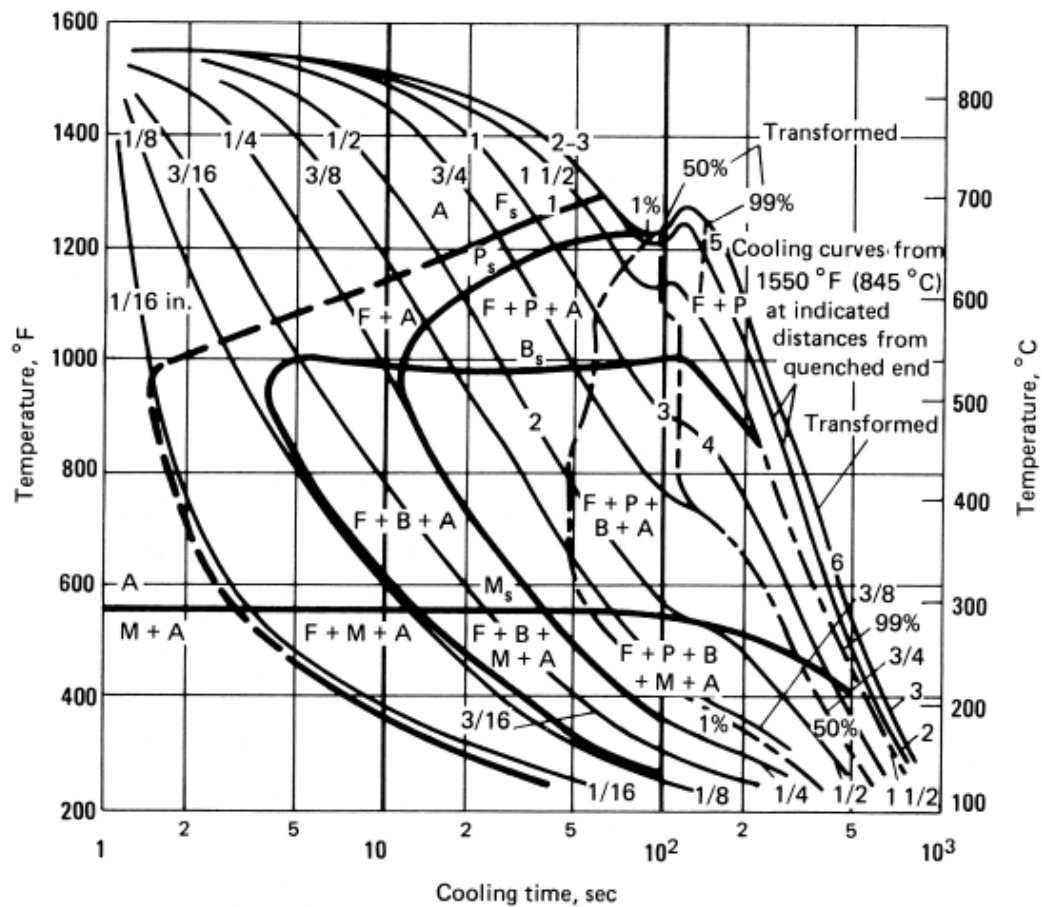
1.4 ACERO AISI-SAE 5160H

Se considera como un acero de aleación de alto carbono, es normal alcanzar durezas de 58 a 63 RC, con tratamiento de temple, y en ocasiones se pueden tener valores mayores dependiendo del contenido de carbono, es usado en la fabricación de resortes y ballestas. El acero AISI-SAE 5160H tiene la composición nominal relacionada en el cuadro 1.1.

En la gráfica de temperatura vs tiempo de enfriamiento, se muestran las curvas de transformación para diferentes espesores, de un material con una composición determinada (0,63C, 0,86Mn, 0,23Si, 0,83Cr), figura 1.6.

Cuadro 1.1. Rango de composición elemental de acero AISI-SAE 5160H¹.

Elemento	Porcentaje
C	0,55 - 0,65
Mn	0,65 – 1,0
P max	< 0,035
S max	< 0,040
Si	0,15 – 0,30
Cr	0,6 – 1,0

Figura 1.6. Curvas de transformación para el acero 5160 H².¹ ASM, Heat treatment's guide, standard practices and procedures for steel, Ohio, pp. 198² -ASM, Heat treatment's guide, standard practices and procedures for steel, Ohio, pp. 199, 1982.

1.5 EFECTO DE ELEMENTOS ALEANTES EN LA TEMPLABILIDAD Y TENACIDAD DE LOS ACEROS

Las clasificaciones normalizadas de aceros establecen valores mínimos o máximos para cada tipo de elemento, éstos elementos se agregan para obtener unas características determinadas como templabilidad, resistencia mecánica, dureza, tenacidad, resistencia al desgaste, soldabilidad o maquinabilidad, hay ciertos elementos no deseables que provienen de la materia prima o de la obtención del acero y los cuales no se pueden eliminar totalmente, ocasionado en algunos casos el detrimento de algunas de las propiedades. A continuación se relacionan algunos elementos relevantes para la templabilidad y tenacidad.

Molibdeno: El molibdeno influye más que el cromo y el volframio en la templabilidad, resistencia al revenido y al desgaste. Probablemente, el molibdeno es el que comunica en mayor grado al acero su aptitud para el temple al aire. El efecto característico del molibdeno es el descenso de la zona crítica por enfriamiento, por lo que tiende a suprimir la formación de ferrita aun a moderadas velocidades de enfriamiento y disminuye el efecto de ablandamiento del revenido. El molibdeno se disuelve en el hierro, y en presencia de carbono forma carburos complejos. A través de su capacidad de formación de carburos, el molibdeno, cuidadosamente combinados con cromo y vanadio, es muy eficaz para retrasar la pérdida de resistencia durante el revenido, mientras que mejora la tenacidad de fractura. La fragilización en el revenido se debe a la segregación de impurezas tales como fósforo, arsénico, antimonio y estaño en los límites de grano, debido a que el átomo de molibdeno es muy grande en relación a otros elementos de aleación e impurezas, el molibdeno impide la migración de esos elementos, y por lo tanto proporciona resistencia a la fragilización por revenido.

Silicio: En los aceros con mucho carbono, particularmente si están templados, el silicio aumenta la fragilidad.

Antimonio: La fragilización por antimonio se da debido a su electronegatividad debido a respecto a los metales de transición que fragiliza, la transferencia de carga al antimonio desde los metales que lo rodean deja menos electrones para participar en la unión metal-metal y la debilita¹.

¹ Briant C., Messmer R. Acta Metal. Vol. 32. No. 11 pp 2043-2052. 1984.

Fósforo, Antimonio y Estaño: Son elementos no deseados en aceros que soliciten alta tenacidad tales como los utilizados en fabricación de ballesta, éstos elementos son los responsables en un alto porcentaje de la fragilización del material, en especial el fósforo, para el cual la norma pide porcentajes menores a 0.035, pero estudios han demostrado que es recomendable tener niveles menores a 0.01¹.

¹ D. B. Villarino, Influence of Phosphorus content and Quenching/Tempering temperatures on fracture toughness and fatigue life of SAE5160 steel.

2 DESARROLLO EXPERIMENTAL

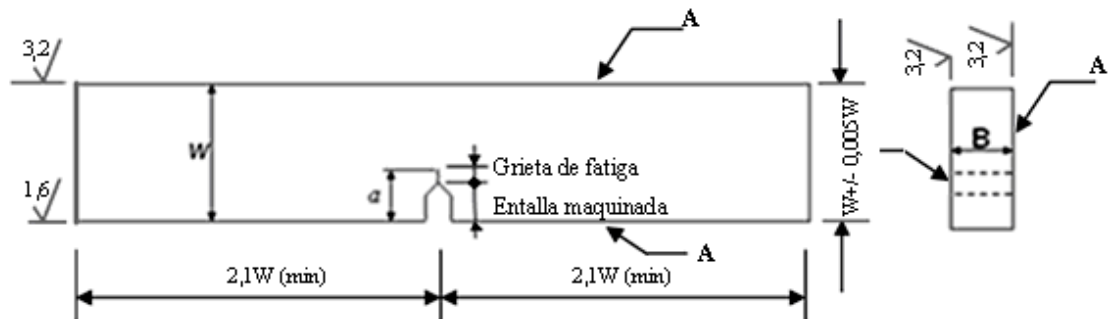
Se inició con una prueba piloto de tenacidad de fractura para de esta manera poder conocer de cierta forma el comportamiento del material con el cual se iba a ejecutar el proyecto, con ésta información previa se realizó un diseño de experimentos y se determinó el número de réplicas adecuado, luego se fabricaron y ensayaron las probetas y además se caracterizó el material y las superficies de fractura obtenidas.

2.1 PRUEBA PILOTO Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Fue necesario determinar adecuadamente el número de repeticiones que se llevaría a cabo por cada tratamiento de este proyecto, por lo tanto para tal propósito se aplicó el siguiente diseño de experimentos.

Inicialmente se realizó una prueba piloto para conocer la desviación estándar que se utilizaría para determinar el número de repeticiones del experimento. Aplicando la norma ASTM E399-08 (Standard Test Method for Linear-Elastic Plane –Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials), en el numeral A3 (Special Requirements for Testing Bend Specimen) se usó la geometría de probeta mostrada en la figura 2.1, con el detalle de la entalla que se muestra en la figura 2.2. La configuración de carga para el preagrietamiento de fatiga y ensayo de flexión en tres puntos se muestra en la figura 2.3.

Figura 2.1. Configuración geometría y requerimientos de la probeta de flexión en tres puntos usada en la prueba piloto y en los ensayos finales de tenacidad de fractura.

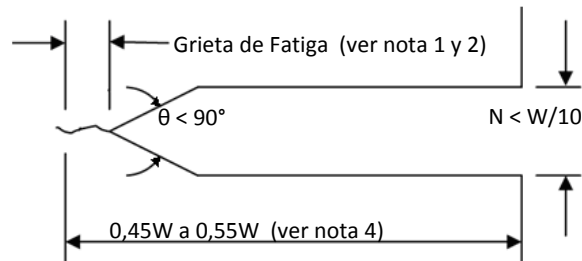


Fuente: ASTM E399-08

Nota 1- Acabado superficial en μm .

Nota 2- Las superficies A deberán estar perpendiculares y paralelas aplicables dentro de $0,001W$.

Figura 2.2. Detalle de la entalla.



Fuente: ASTM E399-08

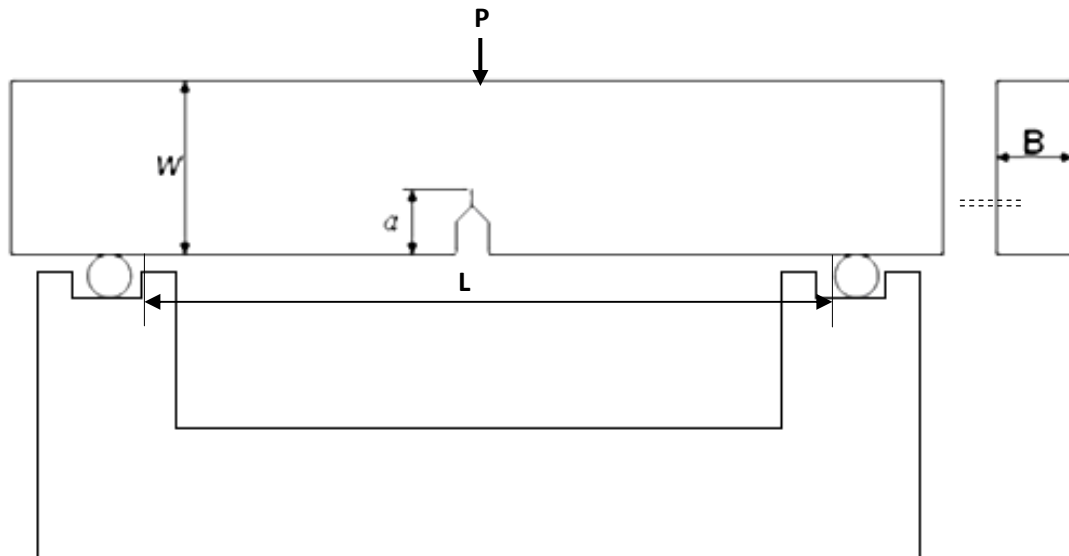
Nota 1- La prolongación de la grieta de fatiga sobre la cara frontal y opuesta de la probeta será una recta, que tendrá por lo menos $0,025W$ o $1,3$ mm ($0,05$ pulgadas), lo que sea mayor.

Nota 2- El inicio de la grieta en la entalla será perpendicular a la superficie de la probeta y la dirección de propagación estará dentro de $\pm 2^\circ$.

Nota 3- El ancho N de la entalla no debe ser inferior a $1,6$ mm ($1/16$ pulgada).

Nota 4- Medido desde el borde de la entalla.

Figura 2.3. Configuración de la carga.



El material de las probetas utilizado para la prueba piloto correspondió a la designación AISI-SAE 5160 H, con esfuerzo de fluencia $S_y=1462\text{MPa}$ ^[1], y con tratamiento térmico de temple en aceite desde 830°C y revenido a 540°C

^[1] Norton Robert, Diseño de máquinas, 1999.

obteniendo dureza de 45RC. Para el caso de esta prueba piloto se fabricaron y probaron cinco (5) probetas, para las cuales se relacionan sus dimensiones y el resultado del ensayo de tenacidad de fractura en el cuadro 2.1.

Cuadro 2.1. Dimensiones de la probeta y resultados de la prueba de tenacidad de fractura.

	B	a	W	L	N	θ	P
# 3	14,1 mm	10,5mm	22,6mm	88 mm	2 mm	80°	1250 Kg
# 6	14,1 mm	12 mm	22,35mm	80,7 mm	2 mm	80°	1078 Kg
# 7	14,1 mm	11,6mm	22,2 mm	82,45 mm	2 mm	80°	1049,9Kg
# 4	14,05mm	12,4mm	21,2 mm	80,25 mm	2 mm	80°	775,9 Kg
# 5	14,1 mm	11,7mm	22,4 mm	87,4 mm	2 mm	80°	1057,9Kg

Posteriormente con la Ecuación 2.1, se determinó la tenacidad de fractura K_{IC} para cada muestra, obteniéndose los resultados relacionado en el cuadro 2.2.

$$K_{IC} = \frac{PL}{BW^{3/2}} \left[2,9 \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} - 4,6 \left(\frac{a}{W} \right)^{3/2} + 21,8 \left(\frac{a}{W} \right)^{5/2} - 37,6 \left(\frac{a}{W} \right)^{7/2} + 38,7 \left(\frac{a}{W} \right)^{9/2} \right] \text{ Ecuación 2.1}$$

Cuadro 2.2. Valor de K_{IC} calculado para cada muestra.

Probeta	K_{IC}
# 3	53,75 MPa√m
# 6	54,57 MPa√m
# 7	52,25 MPa√m
# 4	50,34 MPa√m
# 5	55,02 MPa√m

Con los datos obtenidos se determinó la desviación estándar de las muestras.

Desviación Estándar: **1,91** Mpa√m

Con el valor de la desviación estándar se tuvo un criterio más real para poder encontrar el número de repeticiones requeridas para la ejecución del proyecto. Con la desviación estándar encontrada con la prueba piloto y basados en la teoría de diseños factoriales y tamaño de muestra, y utilizando el número de factores y variables que iban a ser utilizados, cuadro 2.3, se determinó el número de réplicas de cada experimento.

Cuadro 2.3. Factores y niveles del diseño de experimentos.

Factores	Niveles
Factor A Proveedor	Proveedor 1
	Proveedor 2
	Proveedor 3
	Proveedor 4
Factor B Temperatura de Revenido	250°C
	300°C
	350°C
	400°C
	450°C
	500°C
	550°C

Se llevó a cabo un diseño de experimentos de tipo factorial, con dos factores. Se propusieron las hipótesis tanto nula H_0 como alternativa para proveedores, temperatura de revenido y la interacción:

- Hipótesis acerca de la igualdad de los efectos del proveedor:

$$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1 : \text{al menos una } \tau_i \neq 0$$

- Hipótesis acerca de la igualdad de los efectos de la temperatura de revenido:

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$$H_1 : \text{al menos una } \beta_j \neq 0$$

- Hipótesis acerca de la interacción entre los tratamientos (proveedor y temperatura de revenido):

$$H_o : (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{..para ..todas ..las ..}i, j$$

$$H_1 : \text{al ..menos ..una ..}(\tau\beta)_{ij} \neq 0$$

Seleccionando un valor al nivel de significancia $\alpha = 0,01$ y utilizando el apéndice V ¹, se encuentran los siguientes valores consignados en el cuadro 2.4 a partir de la ecuación 2.2.

$$\Phi^2 = \frac{naD^2}{2b\sigma^2} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde: n : Número de repeticiones.

a : Numero de variables de proveedores (cuatro proveedores).

D : Media calculada de la prueba piloto (dos veces la desviación estándar).

b : Número de variables de temperaturas de revenido (siete temperaturas de revenido).

σ : Desviación estándar.

Es una práctica común para proyectos de investigación enfocados a control de calidad utilizar el parámetro D como dos veces la desviación estándar.

¹ Montgomery, Diseño de experimentos.

Cuadro 2.4. Análisis de relación entre Factor (proveedor) y Factor (temperatura de revenido).

Φ^2	Φ	n	a	b	D^2	σ^2	V1	V2	β
4,366	2,089	2	4	7	14,59	1,91	3	28	0,13
6,549	2,559	3	4	7	14,59	1,91	3	56	<0,01
8,731	2,955	4	4	7	14,59	1,91	3	84	<0,01
10,914	3,304	5	4	7	14,59	1,91	3	112	< 0,01
13,097	3,619	6	4	7	14,59	1,91	3	140	< 0,01

Donde Φ^2 : Diferencia entre dos tratamientos.

V1: Grados de libertad (a-1).

V2: Denominador de los grados de libertad ((a*b)(n-1)).

β : Probabilidad de rechazar la hipótesis.

De la relación de los factores relacionados en el cuadro 2.4, se concluyó que con un número de replicas de $n = 3$, se obtenía un riesgo β de cerca de 0,01 o una probabilidad aproximada de 99% de rechazar la hipótesis nula.

2.2 OBTENCIÓN DE PROBETAS

La empresa IMAL S.A. patrocinadora del proyecto, al momento de iniciar la tesis contaba con cuatro proveedores de diferentes países, los cuales para facilidad en el presente documento se designan con la numeración de uno a cuatro, en el cuadro 2.5 se relacionan el país de procedencia del material, la designación dada a cada proveedor, la colada, ancho y espesor del material.

Cuadro 2.5. Proveedor, lote y colada.

DESIGNACIÓN	COLADA	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)
Proveedor 1	31939202	76,5	20,65
Proveedor 2	4089263	90	16
Proveedor 3	891454	90	15,95
Proveedor 4	2F0802343	90	14,9

Las dimensiones de las probetas estuvieron restringidas a la medida del espesor del proveedor 2, el cual tenía un espesor del material de 16mm, por lo cual las dimensiones B y W se establecieron de 15mm y L de 90mm. Con el material suministrado e identificado se procedió a realizar el corte de las probetas, utilizando disco abrasivo y refrigeración adecuada, foto 2.1; inicialmente se procedió a cortar los extremos para eliminar cualquier afectación previa del material, foto 2.2, es de notar la diferencia de ancho y espesor entre los proveedores. Luego se realizó el trazo, eliminando los bordes curvos, y escogiendo como sentido longitudinal de las probetas el mismo de laminación, el cual se seleccionó de esta manera debido a que en servicio las grietas de fatiga que se presentan en las ballestas son predominantemente transversales y el preagrietamiento que se generó fue en éste mismo sentido, foto 2.3. A medida que se trazaron y cortaron las probetas, se enumeraron teniendo en cuenta que fueron cuatro proveedores, siete temperaturas de revenido y tres réplicas, por lo cual por cada proveedor se obtuvieron veintidós probetas, pero se cortaron nueve probetas adicionales para tener de reserva por si se presentan daños de probetas en fabricación, durante tratamiento térmico, en preagrietamiento o en flexión, por lo cual se enumeró cada probeta para cada proveedor como se relaciona en el cuadro 2.6. Para el caso de las probetas de México, proveedor 1, una de las probetas, la que correspondía al número veintidós se paso por alto y no se marco por lo cual la numeración para este proveedor quedo corrido en un dígito a partir del 22.

Cuadro 2.6. Numeración de probetas para cada proveedor.

PROVEEDOR	NUMERACIÓN
P1	1 - 31
P2	37 - 67
P3	73 - 103
P4	109 - 139

Foto 2.1. Maquina de corte y montaje para obtener las probetas con dimensiones aproximadas.

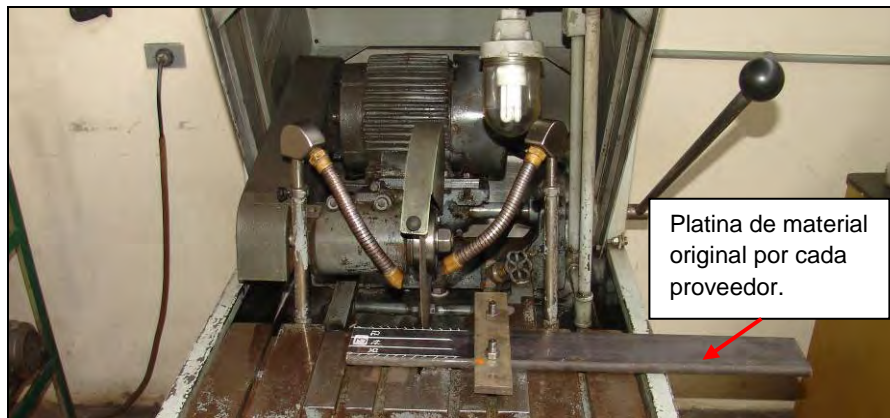
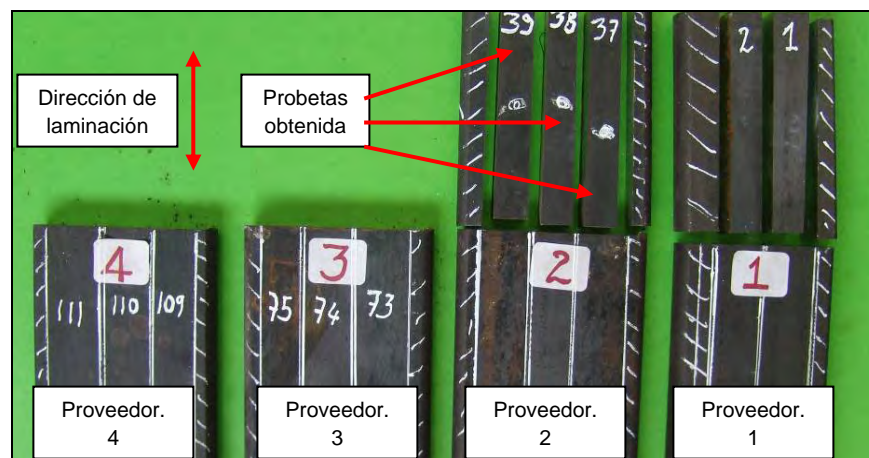


Foto 2.2. Corte de los extremos del material suministrado.



Foto 2.3. Trazo de las probetas con una sobremedida.

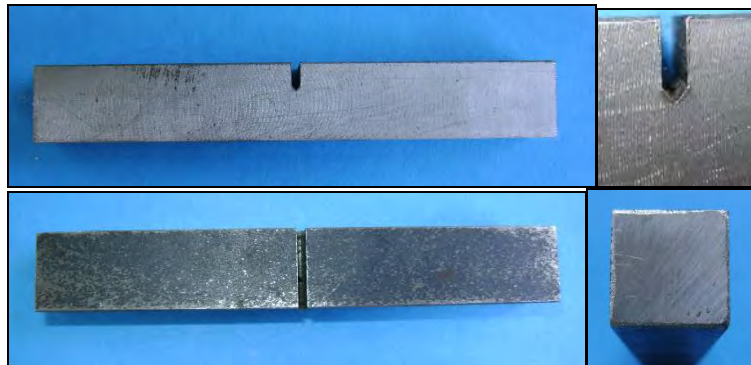


Las probetas se cortaron con una sobremedida de aproximadamente 1 a 2 mm para que en el desbaste y acabado con la fresadora, se obtuviera la medida final y el acabado superficial deseado, además en la fresadora con una fresa de forma se generó la entalla según la geometría solicitada por norma, fotos 2.4 y 2.5.

Foto 2.4. Fresadora donde se dio la medida, acabado final y se generó la entalla.



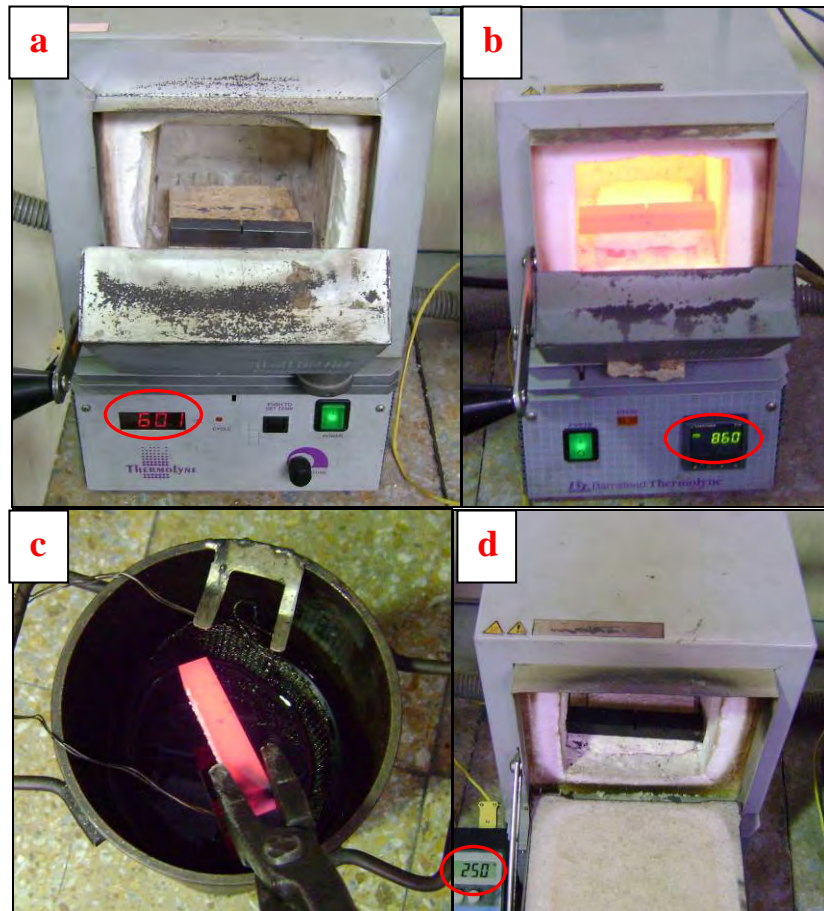
Foto 2.5. Detalle de la entalla mecanizada en una probeta.



Teniendo las probetas con las medidas, acabado superficial y entalla, se procedió a realizar el tratamiento térmico. Se comenzó con un precalentamiento de las probetas a 600°C durante diez minutos, seguidamente se pasó al horno donde durante quince minutos se austenizó el material a una temperatura de 860°C, la cual corresponde a la temperatura de austenización en proceso de fabricación en la empresa Imal, después de la austenización se continuó con el temple en aceite

agitado y luego durante una hora se llevó a cabo el revenido a las temperaturas seleccionadas (250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C y 550°C), dichas temperaturas rodean la temperatura de revenido utilizada en proceso de fabricación en la empresa Imal la cual esta en 460°C, foto 2.6.

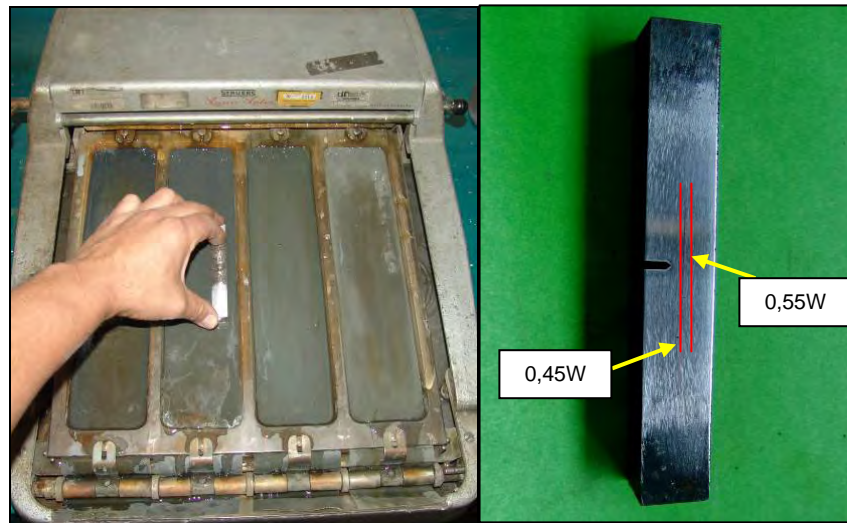
Foto 2.6. Tratamiento térmico de temple y revenido. a- Precalentamiento, b- Austenización, c- Temple, d- Revenido.



En este momento las probetas se encontraban listas para ser preagrietadas en la máquina de fatiga, pero gracias a la experiencia obtenida en la prueba piloto se hizo necesario pulir la superficie donde se iba a observar el crecimiento de la grieta, ya que así se detectaría con mayor facilidad el inicio y crecimiento de grieta por fatiga, lo cual se hizo pasando la cara lateral de las probetas por lijas número 180, 320, 600, 1200 y 2000, foto 2.7. En la máquina de fatiga se preagrietaron las

probetas teniendo presente que la carga aplicada no generará una deformación plástica en punta de grieta que invalidaría la prueba, según la norma ASTM E399-08, numeral 7.2.1, la grieta debe tener una longitud (a) dada entre $0,45W$ y $0,55W$, dichos límites se trazaron en la probeta, foto 2.7.

Foto 2.7. Pulido de la probeta y trazo de los límites de parada de la grieta entre $0,45W - 0,55W$.



2.3 PREAGRIETAMIENTO Y FLEXIÓN DE PROBETAS

Las probetas fueron preagrietadas en una máquina de ensayos a fatiga BALDWIN modelo SF-10-U, foto 2.8, la cual está diseñada para ensayo de probetas, elementos de máquinas, componentes estructurales y en general materiales sujetos a esfuerzos de tensión, compresión, flexión, torsión o esfuerzos combinados. Forma parte del grupo de máquinas de ensayos a la fatiga que producen su carga repetida a través de un oscilador mecánico, que básicamente es una masa montada excéntricamente conducida por medio de acoples flexibles por un motor síncrono. La función de la máquina es producir una fuerza vibratoria sinusoidal, sobrepuesta, si es requerido, a una fuerza estática y mantener estas fuerzas durante la realización del ensayo de fatiga dentro de unos límites especificados.

Foto 2.8. Máquina de fatiga usada para el preagrietamiento de las probetas.



Al momento de llevar a cabo el ensayo se debió asegurar que la probeta quedara debidamente centrada y alineada, además para detectar el inicio y crecimiento de la grieta fue necesario aplicar luz rasante, foto 2.9, y apoyarnos en una lupa de 10X para poder apreciar con más facilidad la grieta, foto 2.10. En la mayoría de los casos la grieta se intentó detener en el intermedio de los límites dados, o sea se detuvo aproximadamente a 0,5W, foto 2.11.

Posterior al preagrietamiento las probetas fueron sometidas al ensayo de flexión en tres puntos en la máquina universal Shimadzu UH-500Kn, foto 2.12. Para el ensayo la probeta se apoyó inferiormente a una distancia $L=88\text{mm}$ y se fue cargando progresivamente en el centro de la probeta en la parte superior hasta lograr su fractura, foto, 2.13.

Foto 2.9. Montaje de la probeta a ser preagrietada.

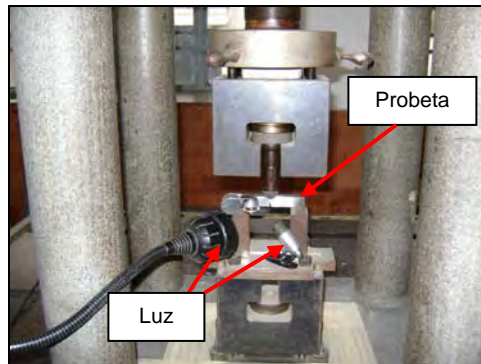


Foto 2.10. Inspección del inicio o crecimiento de la grieta.



Foto 2.11. Probeta preagrietada hasta aproximadamente 0,5W.

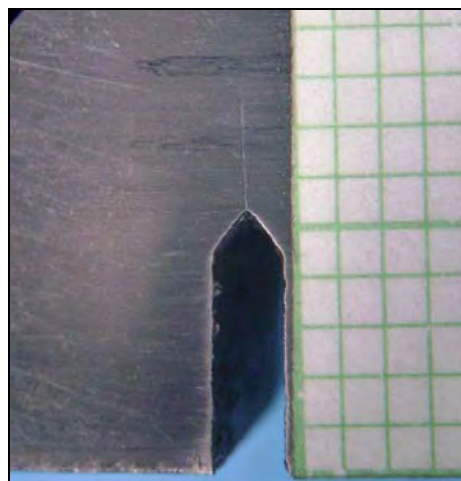


Foto 2.12. Máquina universal Shimadzu, donde se realizó la flexión.



Foto 2.13. Montaje y flexión de una probeta.



2.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS ENSAYADAS Y DEL MATERIAL

Se realizaron diferentes análisis tanto a la superficie de fractura obtenida como al material. La superficie de fractura se examinó exhaustivamente a diferentes aumentos “Fractografía”, para encontrar las características topográficas de la superficie y poderlas relacionar con un tipo de fractura, mientras que el material se caracterizó por medio de diferentes análisis tales como composición química, dureza y metalografía.

2.4.1 Fractografía.

Se realizó una inspección visual a simple vista de la superficie de fractura, y con la ayuda de lentes se fue inspeccionando a mayores aumentos. Con el microscopio electrónico de barrido se inspeccionó la superficie a niveles de aumentos no obtenidos por medios ópticos.

2.4.1.1 Inspección visual.

A simple vista se detalló la forma de la superficie de fractura, la rugosidad, el color, etc., luego con la ayuda de un estereoscopio se inspeccionó la superficie de fractura a diferentes aumentos y se fue relacionando la superficie de fractura con un tipo de fractura característica (granular brillante, tersa, fibrosa, etc.). En las probetas sometidas a ensayo de flexión se encontraron tres zonas características como es la zona 1 generada durante el preagrietamiento, la zona 2 correspondiente a la interfaz entre el preagrietamiento y la fractura final por flexión y la zona 3 correspondiente a la fractura final por flexión, foto 2.14.

2.4.1.2 Microscopio electrónico de barrido SEM.

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido (SEM), marca FEI referencia Quanta 200, foto 2.15. En el SEM se apreció cada una de las tres zonas características de la fractura, foto 2.16. Detallando a elevados aumentos la zona 1 correspondiente a la generada durante el preagrietamiento en la máquina de fatiga, fue común apreciar estrías de fatiga, foto 2.17. En la zona 2 correspondiente a la transición entre la zona generada durante el preagrietamiento y la zona generada en el ensayo de flexión, se apreció claramente el límite entre ambas superficies, foto 2.18. En la zona 3 generada en el ensayo de flexión donde se dio la fractura súbita final, se apreció para el caso de la probeta seleccionada

una superficie de fractura constituida por clivaje, foto 2.19, y en otros casos fracturas intergranulares, coalescencia de microvacíos o mezclas entre éstas.

Foto 2.14 Superficie de fractura de una probeta flexionada. 15X.

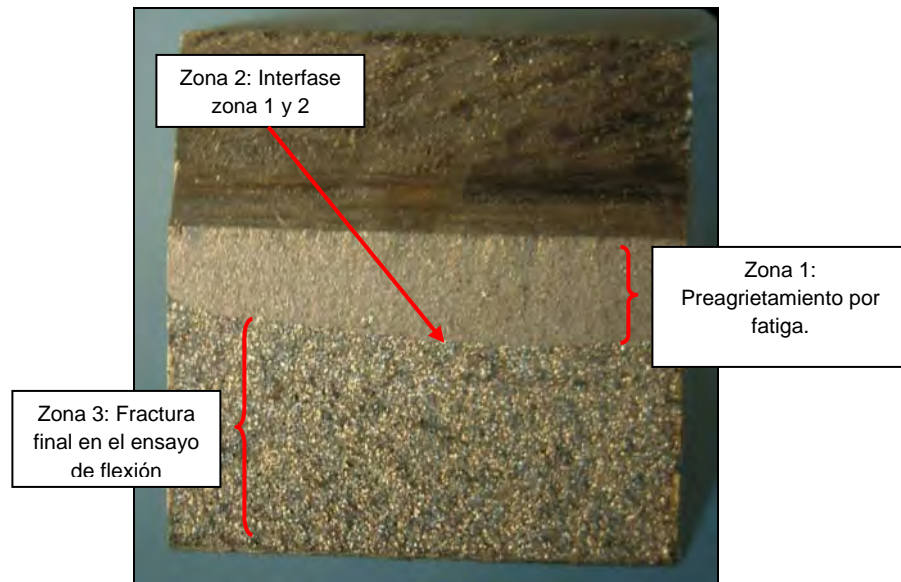


Foto 2.15. Microscopio electrónico de barrido SEM usado en el proyecto, FEI QUANTA 200.



Foto 2.16. Zonas características de la fractura de las probetas. SEM. 17X.

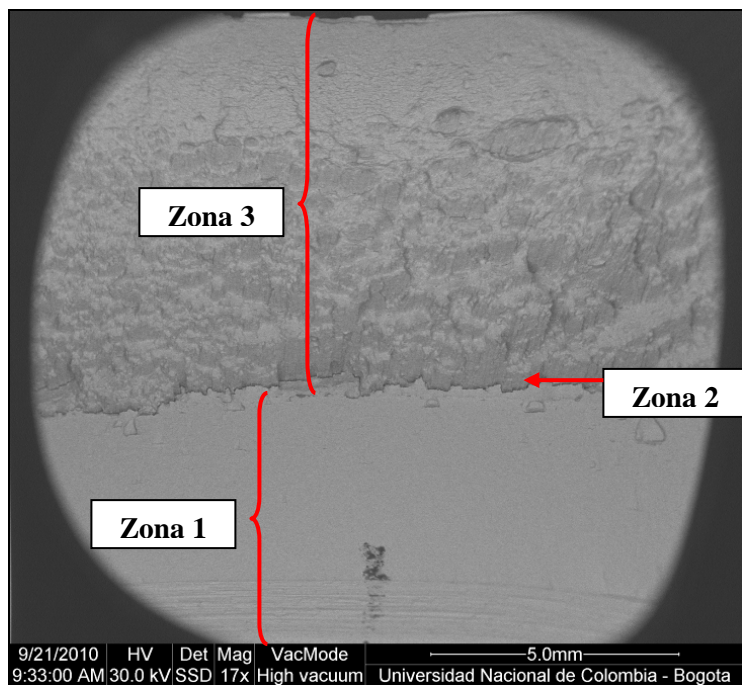


Foto 2.17. Detalle de la zona 1 de una probeta típica, con presencia de estrías. SEM. 6000X.

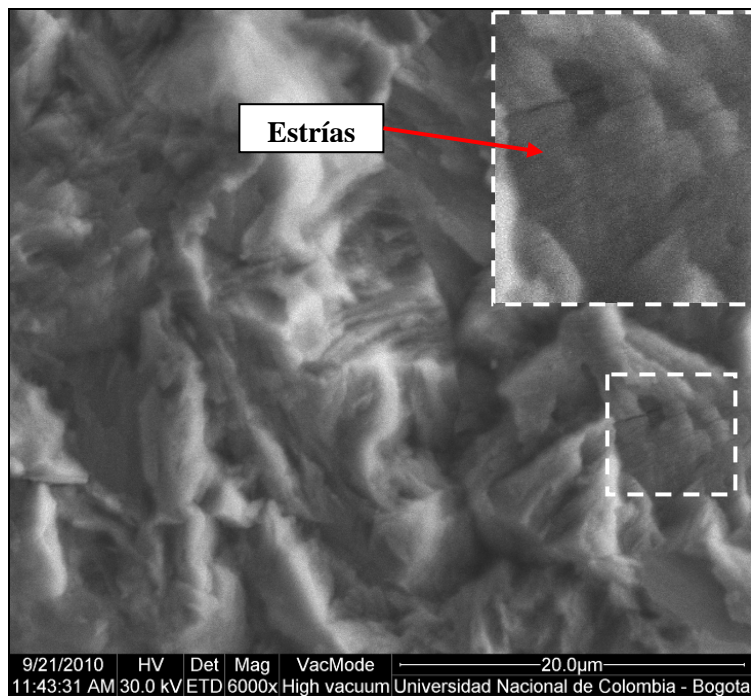


Foto 2.18. Detalle de la zona 2, zona de interfaz. SEM. 1600X.

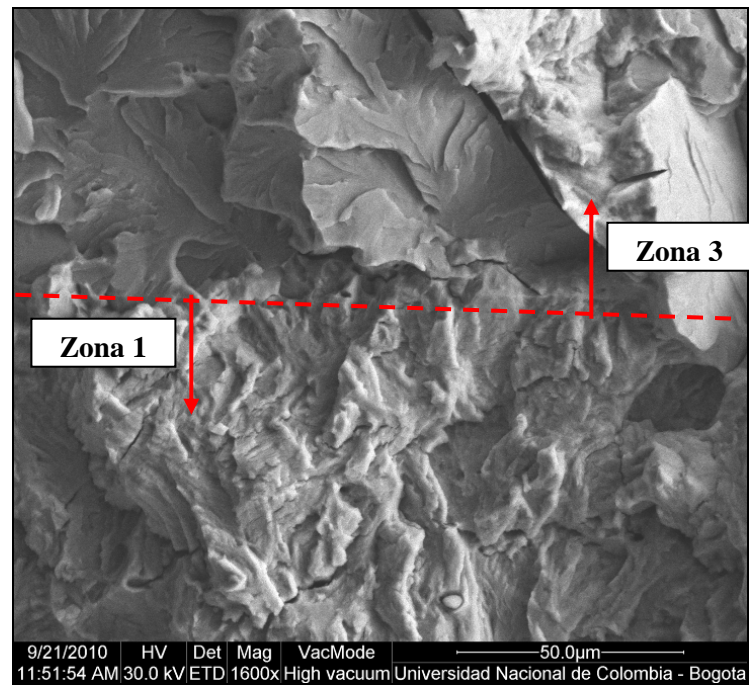
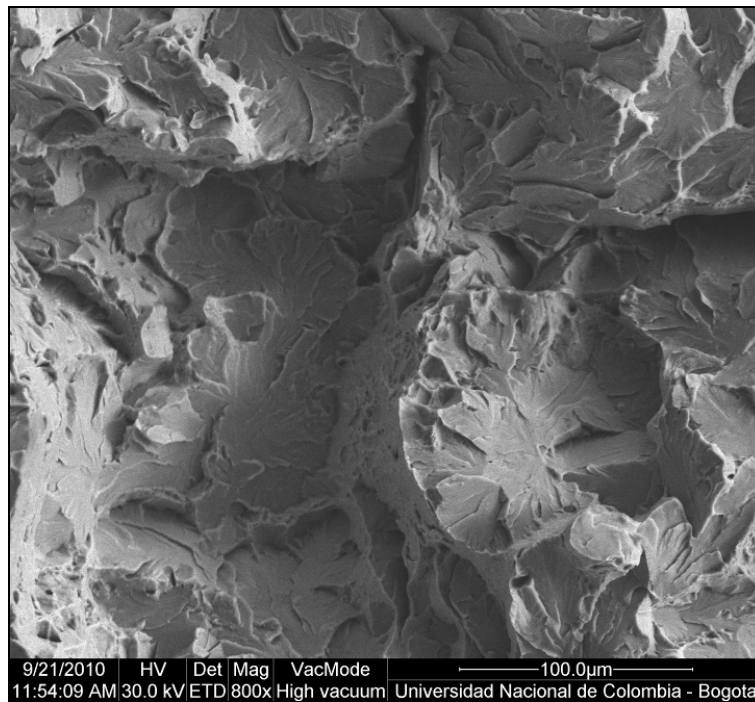


Foto 2.19. Detalle de la zona 3, clivaje. SEM. 800X.



2.4.2 Caracterización del material.

La caracterización del material se realizó por medio de diferentes ensayos, para el presente trabajo se llevaron a cabo ensayos de composición química, dureza y metalografía.

2.4.2.1 Composición química.

Para la composición química se utilizó un espectrómetro de chispa UV-VIS marca BAIRD, y se llevó a cabo el análisis de composición química sobre el material en estado de suministro de cada uno de los cuatro proveedores, foto 2.20. En la tabla 2.1 se relaciona la composición química del proveedor 1, en la tabla 2.2 la composición química del proveedor 2, en la tabla 2.3 la composición química del proveedor 3 y en la tabla 2.4 la composición química del proveedor 4. En todos los casos se comprobó que se trata del acero AISI-SAE 5160H.

Foto 2.20. Espectrómetro de chispa UV-VIS marca BAIRD, usado en el proyecto.



Tabla 2.1. Composición química del material del proveedor 1. Porcentaje en peso.

Fe 97.033	C 0.612	Mn 0.873	P < 0.001	S 0.003
Si 0.333	Cu 0.194	Ni 0.073	Cr 0.805	V 0.003
Mo 0.021	W < 0.005	Co 0.010	Ti 0.003	Sn 0.012
Al 0.001	Nb 0.017	B < 0.000	Pb 0.007	Mg < 0.000

Tabla 2.2. Composición química del material del proveedor 2. Porcentaje en peso.

Fe 97.237	C 0.575	Mn 0.855	P 0.009	S 0.012
Si 0.248	Cu 0.123	Ni 0.075	Cr 0.793	V 0.007
Mo 0.038	W < 0.005	Co 0.009	Ti 0.002	Sn 0.005
Al 0.004	Nb < 0.002	B 0.000	Pb 0.007	Mg < 0.000

Tabla 2.3. Composición química del material del proveedor 3. Porcentaje en peso.

Fe 97.196	C 0.585	Mn 0.866	P 0.012	S 0.013
Si 0.250	Cu 0.124	Ni 0.074	Cr 0.807	V 0.007
Mo 0.039	W < 0.005	Co 0.009	Ti 0.002	Sn 0.006
Al 0.004	Nb < 0.002	B 0.001	Pb 0.007	Mg < 0.000

Tabla 2.4. Composición química del material del proveedor 4. Porcentaje en peso.

Fe 97.332	C 0.570	Mn 0.821	P 0.011	S 0.007
Si 0.284	Cu 0.101	Ni 0.034	Cr 0.783	V 0.005
Mo 0.012	W < 0.005	Co 0.012	Ti 0.004	Sn 0.013
Al 0.004	Nb < 0.002	B 0.000	Pb 0.007	Mg < 0.000

2.4.2.2 Dureza.

Se tomó dureza en escala Rockwell C en un durómetro marca GNEHM HORGEM, el cual tiene una resolución de 1 unidad Rockwell C, foto 2.21. Las medidas de dureza se tomaron en la superficie del material en sección transversal, esta dirección fue tomada para tener un promedio más real de la lectura de dureza, ya que las inclusiones tipo sulfuros están de punta. Los resultados de las durezas de los aceros en estado de suministro se relacionan en el cuadro 2.7, con su correspondiente promedio y desviación.

2.4.2.3 Metalografía.

En sección longitudinal del material de suministro se inspeccionó el nivel de inclusiones, encontrándose para los cuatro proveedores un contenido de inclusiones dado por los índices JK A2 finos y D2 gruesos (sulfuros en cantidad 2 de las series finas, y óxidos en cantidad 2 de las series gruesas, medidas por comparación), foto 2.22. Bajo ataque químico con nital al 3% en sección trasversal se reveló una microestructura compuesta mayoritariamente por perlita y en un menor porcentaje por ferrita para el estado de suministro, los cuatro proveedores presentaron microestructuras similares, foto 2.23.

Foto 2.21. Durómetro usado para el proyecto.



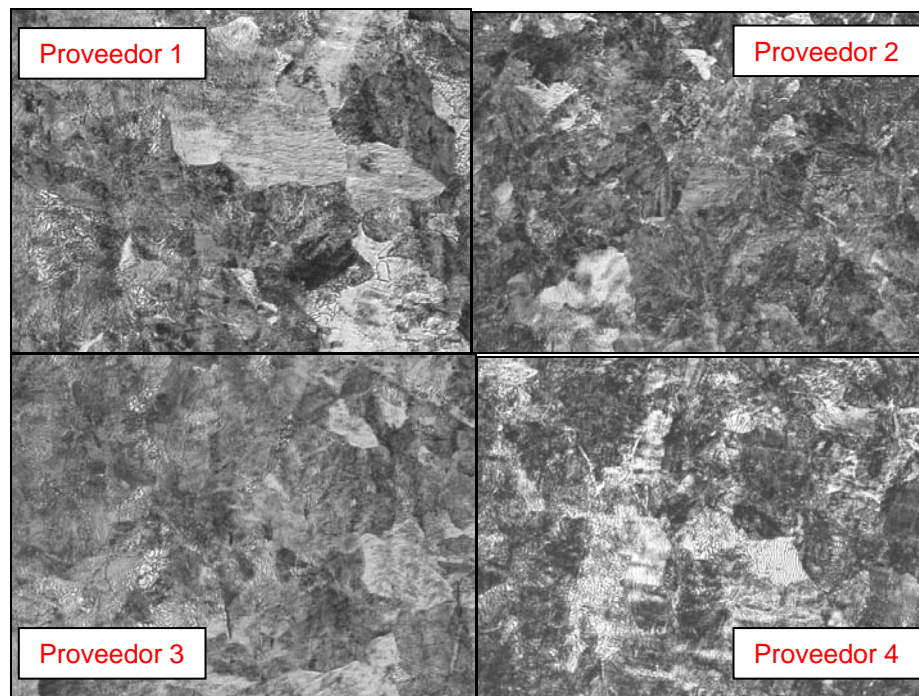
Cuadro 2.7. Durezas del material de los proveedores, en estado de suministro.

SUMINISTRO DUREZA RC				
	PROVEEDOR			
#	1	2	3	4
1	26	31	28	27
2	27	30	30	29
3	25	31	30	30
4	26	31	30	29
5	24	32	29	30
Promedio	25,6	31	29,4	29
Desviación	1,1	0,7	0,9	1,2

Foto 2.22. Inclusiones A2f y D2g, de los 4 proveedores, sección longitudinal. 100X.



Foto 2.23. Microestructura de los cuatro proveedores en estado de suministro, sección transversal. Granos de perlita y red de ferrita. Nital 3%. 800X.



3 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de preagrietamiento generado en la máquina de fatiga y de la prueba de flexión llevada a cabo en la máquina universal, además se relacionan los resultados de los análisis de fractografía, metalografía y dureza para cada proveedor y temperatura de revenido.

3.1 PREAGRIETAMIENTO EN LA MÁQUINA DE FATIGA

En este ensayo fue muy importante tener un rango de carga adecuado, si la carga era muy baja, el inicio y crecimiento de la grieta llegaba a ser muy prolongado y el tiempo para llegar hasta 0,5W podía durar aproximadamente siete (7) horas por probeta, por otro lado, si la carga era muy alta se generaba deformación en punta de grieta y la rotura de la probeta en muy pocos ciclos sin poder detectar el inicio de la grieta. La carga total aplicada a la probeta estaba compuesta por una carga estática (media) y una carga dinámica (alternante), para dar una carga total de fatiga tipo oscilante. En ocasiones dependiendo de la rata de crecimiento de la grieta se varió la carga para aumentar o disminuir la velocidad de crecimiento, en cualquier caso se evitó que la carga máxima aplicada superara el 60% de la tenacidad de fractura esperada¹, es decir, el 60% del promedio de los datos del Cuadro 2.2 (53,186 MPa√m), lo que da 31,91 MPa√m.

Basados en la prueba piloto se inició con el preagrietamiento de una de las probetas, en estado de suministro y se preagrietó con una carga estática de 297 Kgf y una carga dinámica de 100 Kgf, dichas cargas se mantuvieron sin variación, la grieta en la probeta alcanzó la longitud de 0,5W a los setecientos veintinueve mil ciclos (729000) ciclos, lo cual representó en tiempo aproximadamente seis horas con cuarenta y cinco minutos para una sola probeta. Se realizó el recocido de otra probeta y se preagrietó a una carga estática de 297 Kgf y una carga dinámica de 100 Kgf, para éste caso el inicio de grieta se detectó a los cincuenta y cinco mil (55.000) ciclos y se detuvo a los ciento treinta y siete mil (137.000) ciclos, cuando la grieta había avanzado aproximadamente a 0,5W. Estos dos primeros ensayos mostraron que el tiempo de preagrietamiento dependía del tratamiento térmico y por lo tanto de la tenacidad, por ello cada probeta tuvo una carga y

¹ Norma ASTM E399-08, Anexo A8, página 27.

250°C								
Proveedor	Probeta #	Cambio de cargas (# Ciclos)	Estática (Kg)	Dinámica (Kg)	Inicio Grieta (# Ciclos)	Parada de preagrietamiento (# Ciclos)	Rompe (# Ciclos)	Tamaño grieta final (mm)
1	1		204,96	75				8,2
		130.000		80				
		180.000	256,2		183,000	188.000		
	2		256,2	75	97,000		101.000	
	3		204,96	65	99,000	179.000		8,1
2	37		256,2	80	78,000			6,9
		81.000		65		127.000		
	38		204,96	65				7,1
		180.000		80	230,000	261.000		
	39		256,2	80	86,000	89.000		8,25
3	73		297,192	100			19.000	
	74		102,48	50				7,2
		44.000	204,96	75	140,000	172.000		
	75		256,2	80	147,000	163.000		7,0
4	109		204,96	80	101,000		114.000	
	110		204,96	80	60,000	80.000		7,6
	111		204,96	75	88,000		92.000	
	133		204,96	75	18,000			7,6
		18.000	153,72	65				
		35.000	174,216	70				
						81.000		

3.2 FLEXIÓN EN LA MÁQUINA UNIVERSAL

En la máquina universal se flexionaron hasta fractura las probetas previamente preagrietadas, realizando un montaje en tres puntos, con este ensayo se obtuvo con el software *trapezium* las tablas y gráficas de carga contra alargamiento y los datos de carga máxima, esfuerzo máximo, energía total y energía hasta el máximo de carga, éstos datos para una probeta se relacionan en el cuadro 3.2, en el Apéndice B se muestran las tablas para todas las probetas analizadas.

Cuadro 3.2. Datos obtenidos con el software *trapezium*.

<i>Probeta</i>	<i>Carga Máxima (kgf)</i>	<i>Esfuerzo Máximo (kgf/mm²)</i>	<i>Energía tf.mm</i>	<i>Energía al Max. tf.mm</i>
<i>1-1</i>	388,448	15,1926	0,11763	0,07689

tf.mm: tonelada fuerza por milímetro.

Las gráficas obtenidas de carga contra alargamiento para cada una de las probetas se clasificaron en dos tipos representativos, la gráfica tipo I (caída lineal), la cual se caracteriza por tener en la primer fase un incremento proporcional entre la carga y el alargamiento, hasta cuando se llega a un máximo de carga, punto en el cual la carga cae linealmente hasta un valor cercano a cero sin presentar variaciones representativas en el eje de alargamiento, también se tiene la gráfica tipo IE (caída lineal escalonada o con cambios de pendiente), en la primer fase es similar a la tipo I, pero cuando llega al máximo la caída presenta algunos escalones o un pequeño cambio en la pendiente, las gráficas tipo I y IE se pueden apreciar en las figuras 3.1 y 3.2 respectivamente. La gráfica tipo II (caída no lineal) se caracteriza por tener en una primer fase un incremento proporcional entre la carga y el alargamiento, hasta cuando se llega a un máximo de carga, punto en el cual la carga desciende y el alargamiento se incrementa gradualmente, hasta un valor cercano a cero, también se tiene la gráfica tipo IIE (caída no lineal escalonada), la cual es similar a la tipo II pero después de que llega al máximo de carga, la carga desciende gradual y escalonadamente, las gráficas tipo II y IIE se pueden apreciar en las figuras 3.3 y 3.4 respectivamente. Las gráficas para cada una de las probetas ensayadas clasificadas en cada uno de los tipos descritos se muestran en el Apéndice C.

Figura 3.1. Gráfica tipo I.

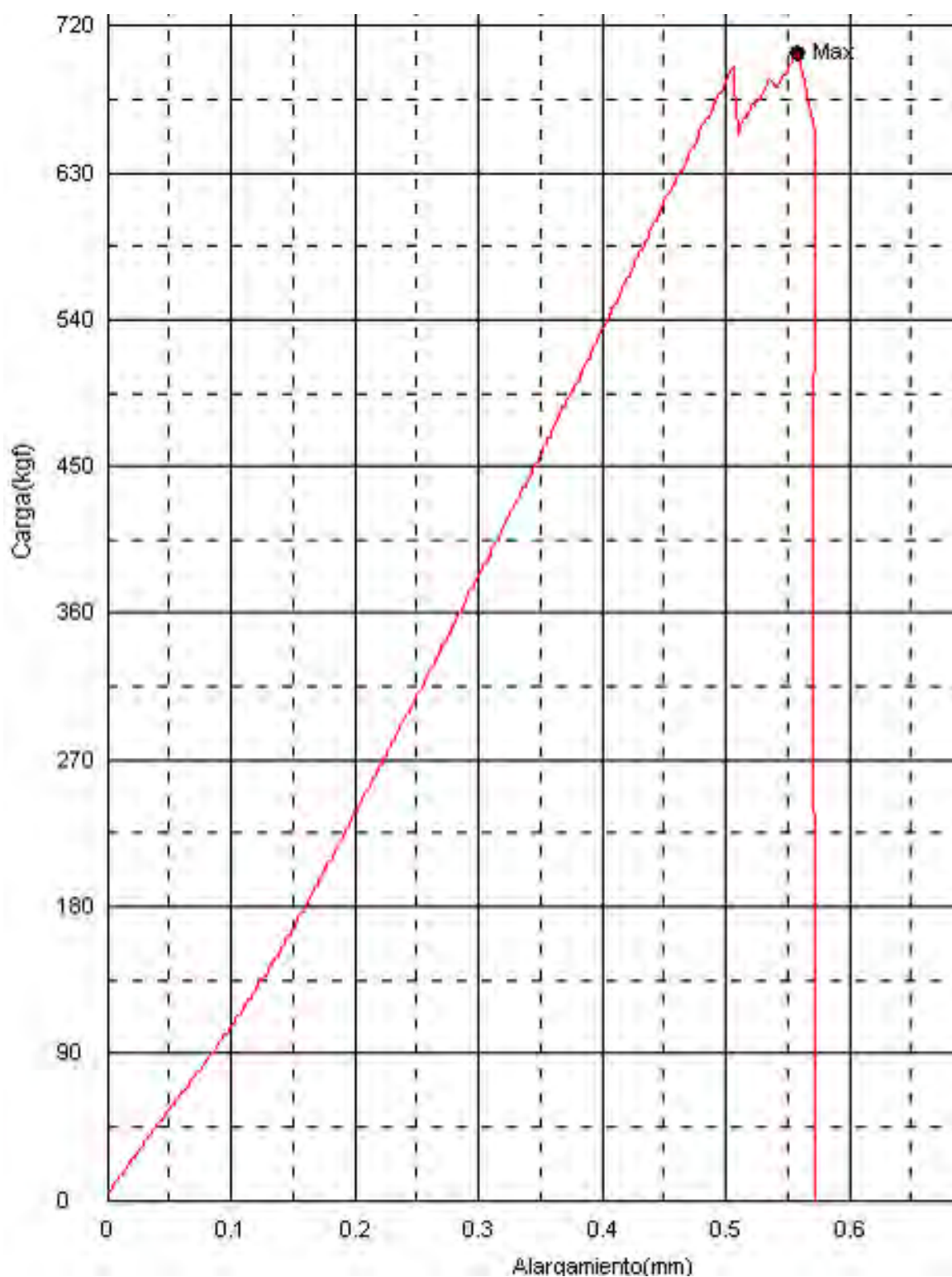


Figura 3.2. Gráfica tipo IE.

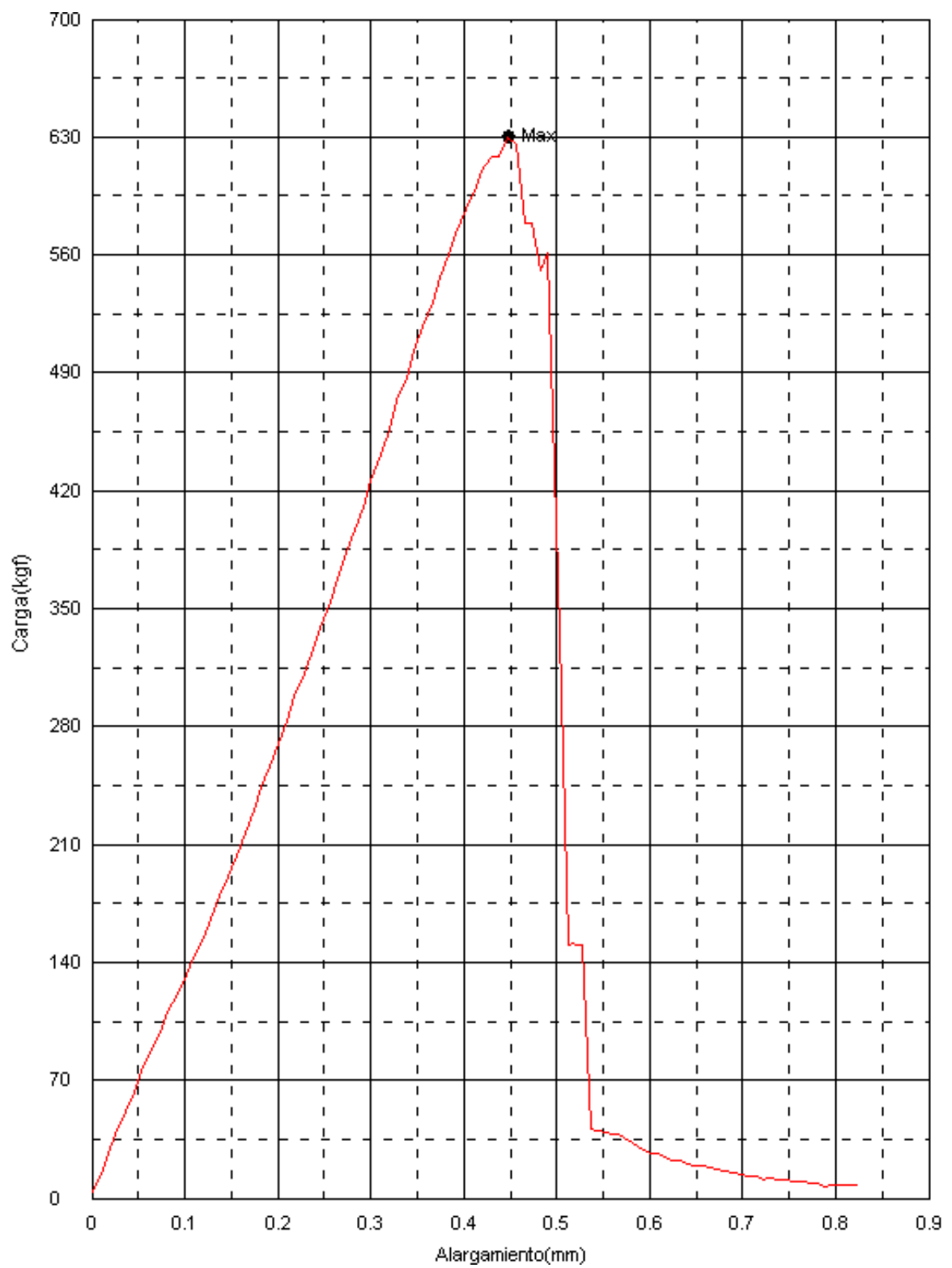


Figura 3.3. Gráfica tipo II.

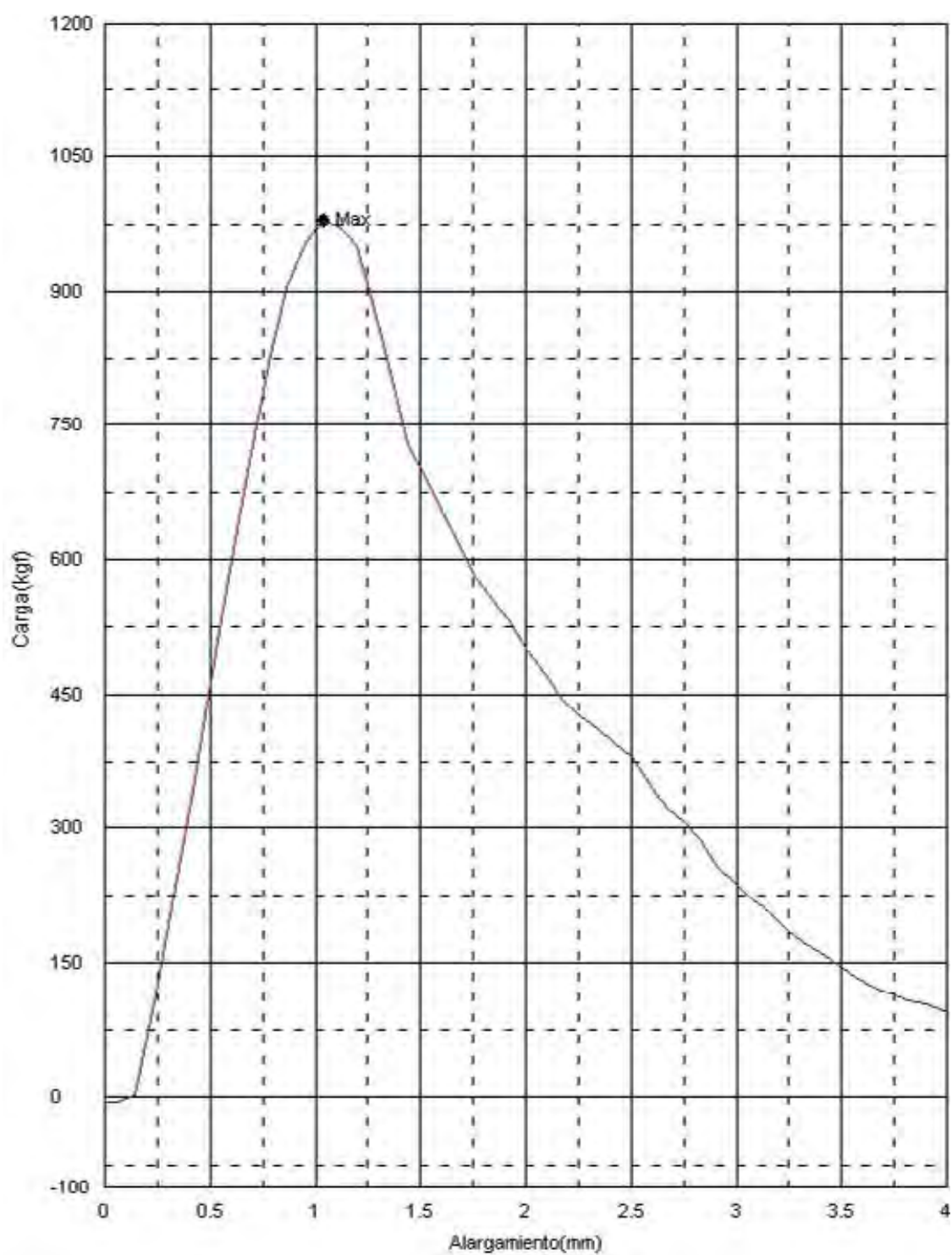
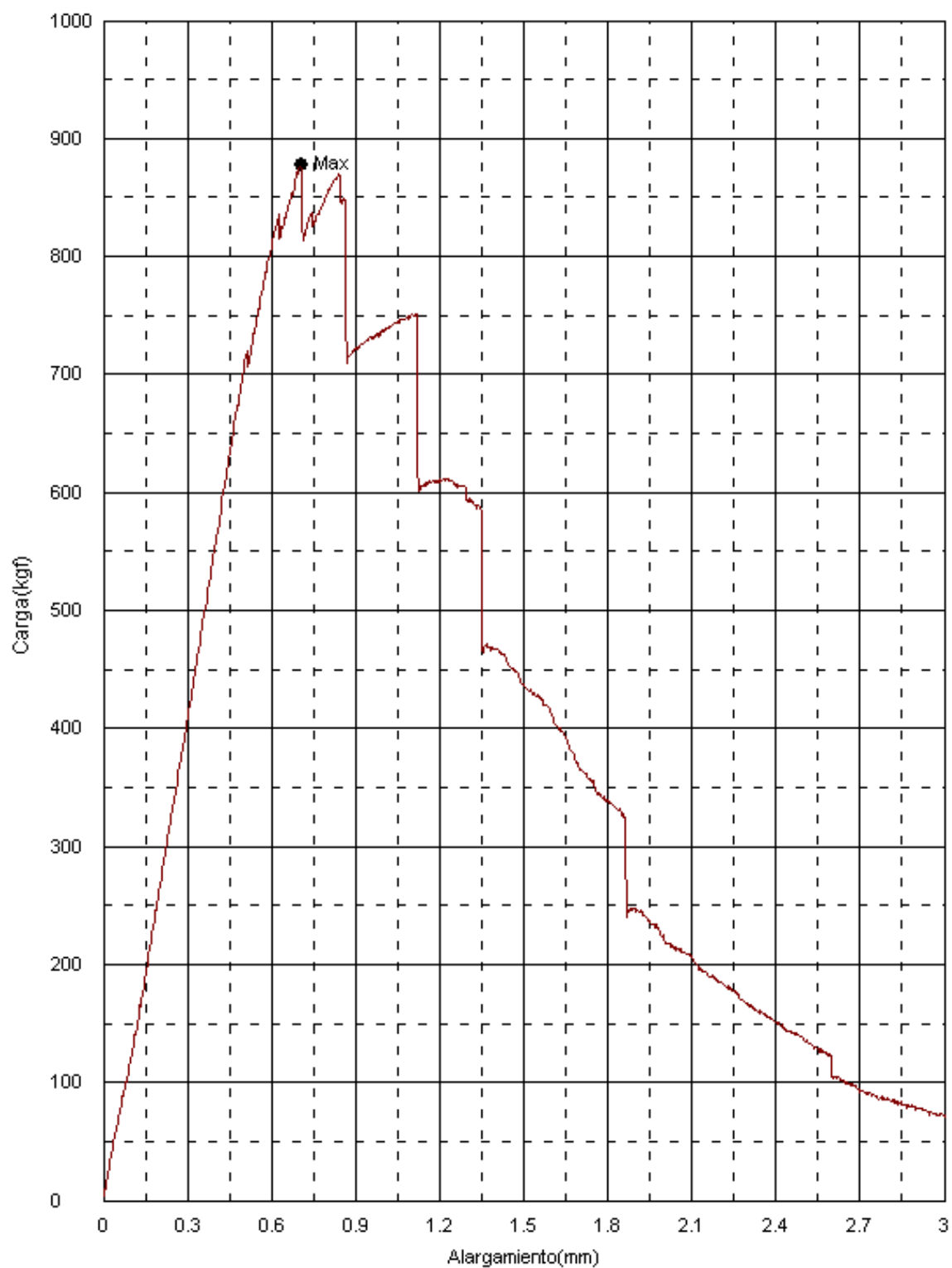


Figura 3.4. Gráfica tipo IIE.



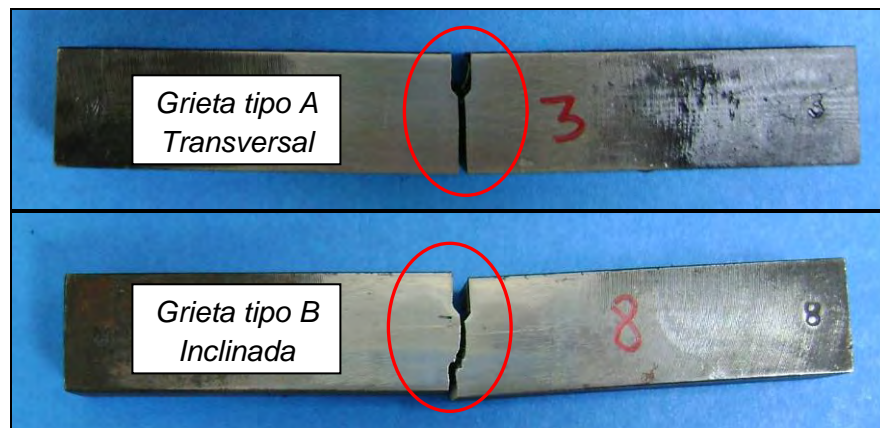
3.3 FRACTOGRAFÍA, METALOGRAFÍA, DUREZA Y TENACIDAD DE FRACTURA

Luego de preagrietadas y fracturadas las probetas se procedió a inspeccionar la superficie de fractura, luego se determinó su microestructura, se tomaron las durezas de cada probeta y finalmente se calculó la tenacidad de fractura.

3.3.1 Fractografía.

La trayectoria de las grietas después del preagrietamiento presentó dos tipologías características para las probetas fracturadas, se presentaron fracturas transversales (tipo A) y fracturas con trayectoria inclinada (tipo B) foto 3.1, en el Apéndice D se muestra la clasificación de las probetas de acuerdo a la trayectoria llevada por la grieta.

Foto 3.1. Tipos de fractura según la trayectoria.



Las probetas fracturadas fueron organizadas por grupos de acuerdo al proveedor y a la temperatura de revenido, se seleccionó una probeta representativa de cada uno de esos grupos, foto 3.2, se analizó su superficie de fractura tanto en el estereoscopio como en el microscopio electrónico de barrido SEM. Observando en el estereoscopio la superficie de fractura generada en el ensayo de flexión, se presentaron dos tipos de textura características; la tipo 1 hace referencia a una textura granular, mientras que la tipo 2 hace referencia a una textura fibrosa, foto

3.3. En el Apéndice E se muestra la clasificación de las superficies de fractura según su textura de las probetas analizadas.

Foto 3.2. Grupos organizados por proveedor y temperatura de revenido de probetas fracturadas, selección de una probeta característica para análisis.

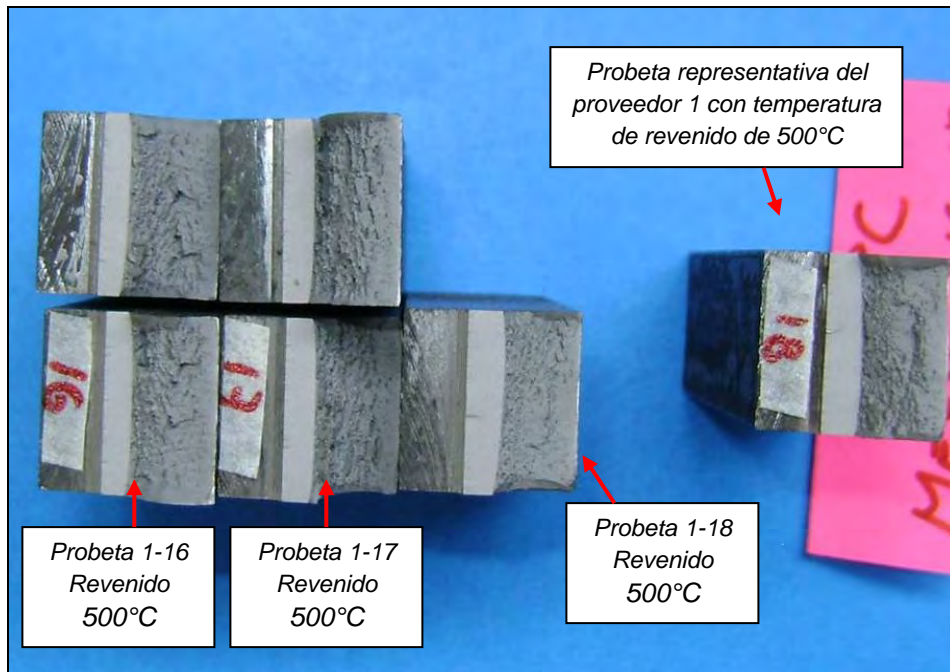
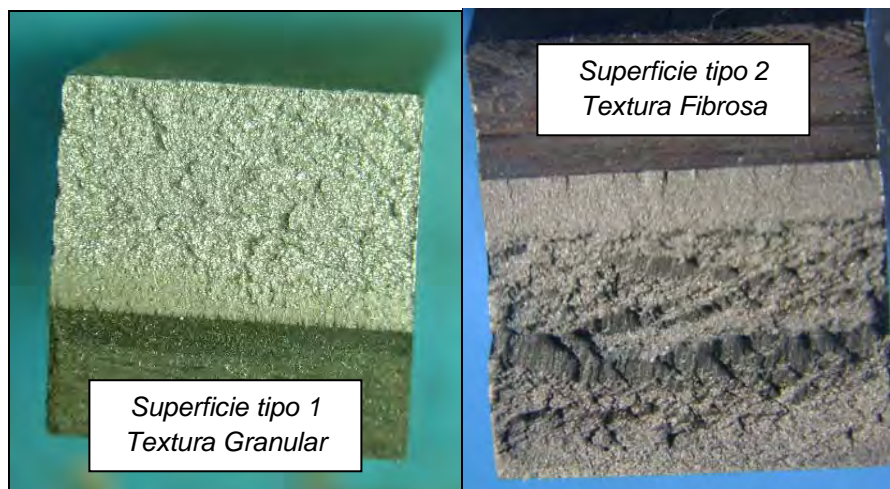


Foto 3.3. Tipos de superficie de fractura según su textura.



En el microscopio electrónico de barrido SEM, se inspeccionó la superficie de fractura en la zona obtenida durante el preagrietamiento, en la zona de transición dada entre el preagrietamiento y la fractura dada por flexión y por último en la zona generada en la fractura por flexión, foto 3.4. Fue normal encontrar estrías de fatiga en la zona de preagrietamiento, foto 3.5, en algunas probetas se evidenció combinación entre fractura intergranular y estrías en la zona de preagrietamiento, foto 3.6. En la interfaz entre el preagrietamiento y la fractura generada en el ensayo de flexión se apreciaron dos tipos de combinación de fracturas características, en algunos casos se encontró en la parte de fatiga las estritaciones y clivaje en la parte de fractura, foto 3.7, mientras que otras probetas en ésta zona presentaron estritaciones en la parte preagrietada y microvacíos en la zona de fractura, foto 3.8. En la zona de fractura generada durante la flexión se presentaron diferentes tipos de mecanismos microscópicos de fractura, tales como clivaje, foto 3.9, fractura intergranular, foto 3.10, y coalescencia de microvacíos, foto 3.11. En algunas probetas en la zona de fractura generada durante flexión se presentó combinación de mecanismos de fractura tales como microvacíos y clivaje, foto 3.12, o en otros casos fractura intergranular y microvacíos, foto 3.13. En el Apéndice F se clasifican las diferentes probetas en uno de los tipos de fracturas mencionadas anteriormente.

Foto 3.4. Zonas inspeccionadas en microscopio electrónico de barrido SEM. 20X.

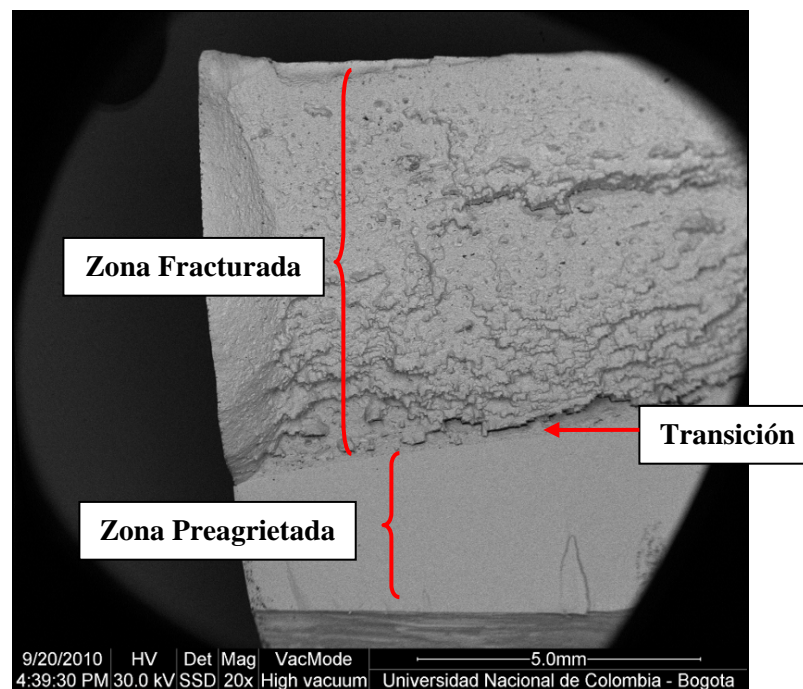


Foto 3.5. Mecanismo microscópico de fractura por fatiga en zona de preagrietamiento, evidencia de estrías de fatiga. 3000X. SEM.

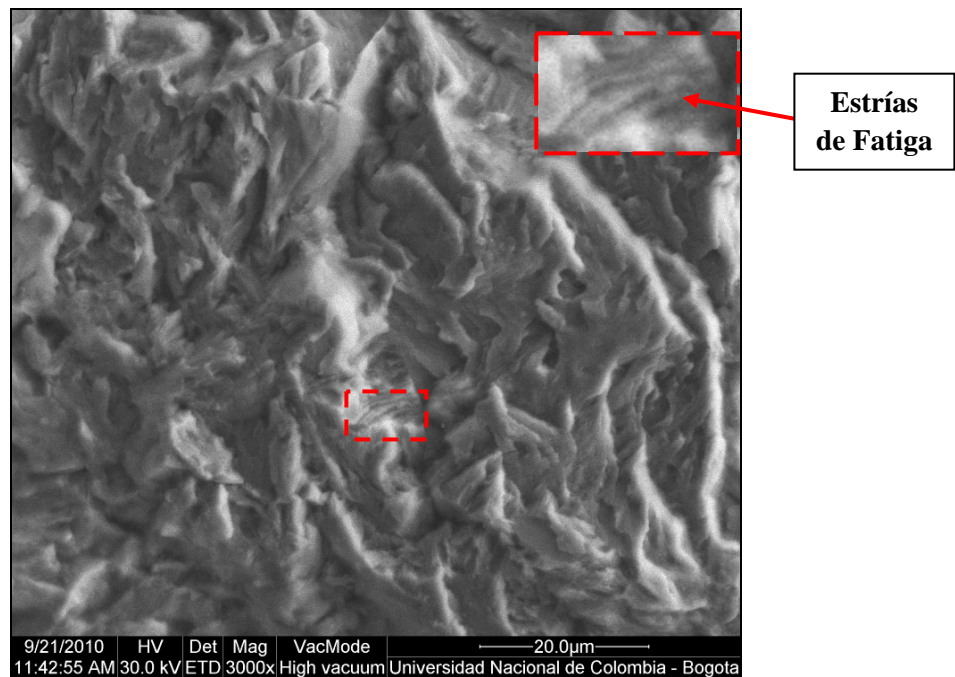


Foto 3.6. Mecanismo microscópico combinado de fractura intergranular y estrías en zona de preagrietamiento. 800X. SEM.

